

我国大气电学研究的最新进展

郅秀书^{1,2} 朱江皖^{1,2} 底绍轩^{1,2} 骆烁名^{1,2} 黄子凡^{1,2} 刘冬霞¹ 张鸿波¹

袁善锋¹ 刘明远¹ 孙竹玲¹ 徐晨¹ 孙春发^{1,2} 王东方¹ 蒋如斌¹ 杨静¹

1 中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室 (LAGEO), 北京 100029

2 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

摘要: 大气电学主要研究地球大气和近地空间发生的电学过程及其机理和影响, 其核心研究内容是雷电物理和雷暴电学。自 1980 年代以来, 中国大气电学研究不断取得新的进展。得益于高时间分辨率雷电探测技术的进步, 大气电学研究不仅在雷电物理学和雷暴云电荷结构方面取得了重要成果, 也在雷电和雷暴对近地空间的影响、强对流天气的雷电特征、以及雷电资料同化和预警预报等方面取得了重要进展。本文从六个方面对近五年来大气电学的主要研究进展进行回顾, 包括高精度雷电探测和定位技术、雷电物理过程和机制、雷暴对中上层大气的影响、雷暴云电荷结构的观测和数值模拟、强对流天气的雷电特征与预报、雷电对气候变化的影响与响应等, 最后对大气电学未来发展进行展望。

关键词: 大气电学, 雷暴, 闪电, 闪电探测, 闪电物理

文章编号:

中图分类号:

文献识别码:

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2306.23307

Atmospheric Electricity Research in China: A Review

QIE Xiushu^{1,2} ZHU Jiangwan^{1,2} DI Shaoxuan^{1,2} LUO Shuoming^{1,2} HUANG Zifan^{1,2} LIU Dongxia¹ ZHANG Hongbo¹ YUAN Shanfeng¹ LIU Mingyuan¹ SUN Zhuling¹ XU Chen¹ SUN Chunfa^{1,2} WANG Dongfang¹ JIANG Rubin¹ YANG Jing¹

1. Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation (LAGEO), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
2. College of Earth and Planetary Science, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049

Abstract: Atmospheric electricity mainly studies the electrical processes occurring in the Earth's atmosphere and near-Earth space as well as their mechanisms and effects. The core research contents are lightning physics and thunderstorm electricity. Since the 1980s, Atmospheric electrical research has continuously made new progress in China.

收稿日期: 2023-7-18; **网络预出版日期:**

通讯作者: 郅秀书, E-mail: qiex@mail.iap.ac.cn

资助项目: 国家自然科学基金重点项目 42230609

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 42230609)

Thanks to the advances in high-time-resolution lightning detection technology, the research on atmospheric electricity has not only achieved important results in the aspects of lightning physics and thunderstorm cloud charge structure, but also in the impact of lightning and thunderstorms on the near-Earth space, and the characteristics of lightning in strong convective weather, and lightning data assimilation and early warning and forecasting of lightning have made important progress. This paper summarizes recent research progress of atmospheric electricity in China in the past five years from six aspects, including high-precision lightning detection technology, lightning physical process and mechanism, the impact of thunderstorms on the middle and upper atmosphere, observation and numerical simulation of thundercloud charge structure, characteristics and forecast of lightning in strong convective weather, the impact and response of lightning on climate change, etc. Based on this review, key priorities for future research on the atmospheric electricity are highlighted.

Keywords: atmospheric electricity, thunderstorm, lightning, lightning detection, lightning physics

1 引言

大气电学是大气科学的重要分支学科，主要研究地球大气和近地空间发生的电学过程及其机制和影响，包括雷电物理和影响、雷暴电学、雷电气象学和气候学、以及晴天大气电现象等研究内容。雷电作为自然界中的一种长距离放电现象，不仅是重要的大气物理过程，也是常与短时强降水、冰雹、雷暴大风和龙卷等强对流天气灾害相伴生的一种严重的气象灾害，对人类生命和财产造成严重威胁。得益于近年来高时空分辨率雷电探测定位技术的开发和应用，近十年来我国大气电研究取得了显著成果，特别是在雷电物理和雷电气象学研究方面取得了重要进展（Qie and Zhang, 2019; Lyu et al., 2023）。

雷暴不仅在对流层产生我们熟知的雷电，也在雷暴云上方诱发中高层大气放电事件，并通过深对流对水物质的直接输送和重力波等影响近地空间的大气环境。雷电还是对流层中氮氧化物（NO_x）的唯一自然来源，对对流层上部的大气氧化能力以及对流层大气化学具有一定影响。此外，雷电也常引发野火和森林火灾，进而影响物种和生态系统的进化。因此，近年来的大气电学研究已经大大拓展了传统的研究范畴，并与空间科学、高能物理等多个领域开展了交叉科学研究。

本文对近五年来我国大气电学领域取得的主要研究成果进行回顾，内容包

括以下六个方面：高精度雷电探测和定位技术、雷电物理过程和机制、雷暴对中上层大气的影响、雷暴云电荷结构的观测和数值模拟、强对流天气的雷电特征与预报、以及雷电对气候变化的影响与响应等，最后对大气电学未来发展进行展望。

2 高精度雷电探测和定位技术

高时间分辨率雷电精细化探测是认识和研究雷电的重要手段和基础。雷电产生的宽频带电磁辐射既是认识雷电物理过程的主要研究对象，也为雷电探测和雷电定位提供了丰富的信号源。目前对雷电的探测主要是通过探测不同频段的电磁波和光辐射来开展，高时间分辨率的雷电精细定位是当前雷电探测的核心和发展方向。雷电定位的目的是确定雷电发生的时间、地点和强度，目前雷电定位技术已经从 1980 年代开始的地闪回击落地点的定位，发展到具有放电过程和通道可分辨的定位能力。本节主要介绍在雷电高精度定位技术和雷暴云内电场探空技术等方面的进展。

2.1 基于低频/甚低频信号的雷电定位技术

基于低频/甚低频（LF/VLF, Very Low Frequency/Low Frequency）信号的雷电定位技术具有探测距离远、抗干扰能力强的优点，可用于大范围内的雷电定位。LF/VLF 信号虽然在传播过程中衰减较小且传播距离远，但该频段由于波长较长，定位精度较低，因此如何在该频段提升雷电定位的精度和准确度是一个重要问题。

中国科学院大气物理研究所 2008 年开始自主开发了宽频段雷电定位网（Beijing Lightning Network, BLNET），从当初的 8 个测站，逐步发展到目前的 22 个测台，站间距离 20-40 km，覆盖了京津冀大部分地区，每个台站都部署了快-慢天线，部分台站同时还安装了磁天线和甚高频（Very High Frequency, VHF）传感器。BLNET 采用到达时间差（Time Of Arrival, TOA）的定位原理，不仅可以实现对雷暴过程中雷电全闪（地闪和云闪）辐射源的三维实时定位，全闪探测效率可达 93.2%（Wang et al., 2016），还可以精细定位给出云闪和地闪的三维放电通道结构（王东方等, 2020; Yuan et al., 2020a）。

在位于山东滨州的人工引雷实验基地周围也建立了低频辐射源三维雷电定位网（VLF-LMS, Very Low Frequency-Lightning Mapping System），采用快天

线、 dE/dt 和磁天线三种低频传感器，通过对采集系统的实时监控和噪声脉冲分析，既保证了数据采集的高效稳定，也有效解决了背景噪声对雷电辐射源三维定位的干扰。通过研发基于到达时间差原理和相位差原理的多种定位算法，包括 Chan 与基于 Tent 映射多尺度变异粒子的双群粒子群（Chan-DPSO, Chan-Discrete Particle Swarm Optimization）相结合的定位算法、Chan 氏算法与局部三维寻优结合定位算法等，实现了雷电云内放电的高精度三维成像，基于人工引发雷电放电通道得到的定位精度约为 100 m（Ma et al., 2021c）。

京津冀和山东北部的两个精细雷电定位网络结合，构成了华北地区雷电全闪局域定位网（NC-LLN, North China Lightning Location Network），用于雷暴尺度上的雷电活动特征研究以及强对流天气的监测和预警；在北京和山东北部分别进行放电通道可分辨的高时空分辨率雷电放电过程的精细定位，用于雷电物理研究。图 1 给出了一次云闪放电过程的三维低频辐射源定位结果，可以明显分辨出雷电通道随时间的发展演化和清晰的通道分叉，图 1a 和图 1b 中还可以清晰地看到雷电在云内的分层发展，上部对应正电荷区，下部对应负电荷区。

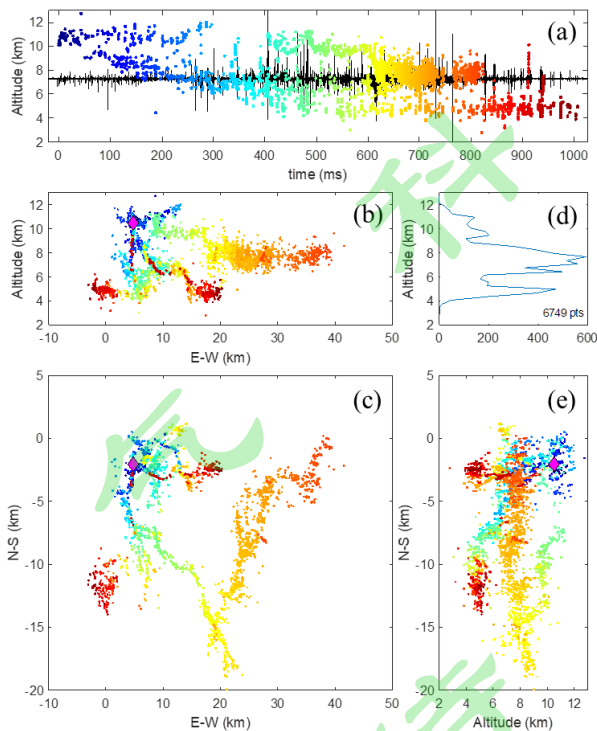


图 1 山东人工引雷实验基地周围布设的 VLF-LMS 给出的一次地闪放电过程的低频辐射源三维定位结果。（a）辐射源高度（彩色点）和电场变化（黑色波形）随时间的演化，从蓝色到红色分别代表时间演化；（b）辐射源在东西方向立面投影；（c）辐射源在水平面上的投影；（d）辐射源随高度的分布；（e）辐射源在南北方向上的立面投影。

Figure. 1 Three-dimensional localization results of the low-frequency radiation source during one ground flash discharge given by the VLF-LMS deployed around the Shandong Triggering Lightning Experiment. (a) Evolution of radiation source height (colored dots) and electric field variation (black waveform) with time, from blue to red representing time evolution respectively; (b) projection of radiation source in the east-west direction in the elevation; (c) projection of radiation source in the horizontal plane; (d) distribution of radiation source with height; (e) projection of radiation source in the north-south direction in the elevation.

中国气象科学研究院在广东雷电野外实验基地部署了低频电场探测阵列（Low-Frequency Electric Field Detection Array, LEFDA），用于广东地区的雷电观测和研究，通过处理后的波形进行定位，获得雷电放电过程的三维精细定位结果，定位精度在百米量级。为了满足实时监测预警的需求，Chen et al. (2019a) 基于 LEFDA 的快电场波形，将时间反演技术引入雷电三维定位算法当中，与传统的时间到达法相比，该方法具有一定的抗干扰能力，并且只需要 4 个测站。Fan et al., (2021a) 在 LEFDA 所获取的电场波形处理中应用了经验模态分解（Empirical Mode Decomposition, EMD）技术，可以在 LF /VLF 频段提高时间到达法的探测能力，将改进后的 EMD 技术引入 LF /VLF 电场信号的处理和雷电定位当中，提出了一种双面双向镜（Double-sided bidirectional mirror, DBM）技术来克服 EMD 的端点效应，实现了低频滤波和低频降噪，大大提高仿真信号的精度。

为观测双极性窄脉冲事件（Narrow Bipolar Event, NBE），中国科学技术大学在江淮地区建立了一个混合长基线江淮天电探测阵列，2019 年以来该探测网络已有 13 个测站，基线距离从百公里到上千公里，该定位系统采用 GPU 并行处理技术，具有实时定位能力，除了观测 NBE 之外，同时也用于对我国东部沿海地区的大尺度的雷暴过程进行雷电定位（Liu et al., 2021a）。

南京信息工程大学在全国范围内建立了多个 VLF（5-30 kHz）雷电接收站，各站以 1 MHz 的采样率连续采集雷电电磁场辐射信号，并将大于阈值的原始波形资料传输至南京中心站进行处理和定位。该系统探测半径达 3000 km，可对我国及周边地区的雷电活动进行大范围探测。Li et al. (2022a) 提出了一种提取雷电球面地波峰值点的新方法，并与等效传播速度法相结合进行雷电定位。该方

法所应用的远程雷电定位系统与中国气象局的地闪定位网资料进行对比，证明了该方法的可行性，并且也有较高的探测效率和较低的定位误差。为了提高该探测系统的精度，Zhang et al. (2022a) 进一步提出了一种补偿地波传播延迟的方法，Dai et al. (2022) 提出了一种改进后的经验小波方法 (Modified Empirical Wavelet Transform, MEWT)，可以处理不同频率的雷电信号，同时对 500-3500 km 的雷电 VLF 信号也有降噪效果。

此外，解放军理工大学也建立了基于 LF 的闪电定位系统，并将频域时间反反转法 (Time-Reversal Approach In The Frequency Domain, TRFD) 应用于闪电辐射源定位中，通过多个个例分析表明，该定位方法所给出的结果比 TOA 方法给出的结果更细致连续 (Liu et al., 2019)。

近两年，一些新的定位算法不断被提出，例如 Wang et al. (2021c) 将 Pearson 相关算法与 EMD 相结合进行长时间脉冲序列的电场脉冲匹配，提高了雷电脉冲匹配的精度，定位结果精度和质量显著提高。Wang et al. (2021b) 提出了一种基于深度学习的波形编码特征匹配方法，提高了匹配效率和定位速度，同时也具有更好的精细定位能力和抗干扰能力。

2.2 基于 VHF 频段的雷电定位技术

基于 VLF/LF 辐射信号的定位技术，主要是反映诸如回击、连续电流过程等大尺度的放电过程的探测及定位，而 VHF 信号对高时空分辨率的雷电放电通道的精细定位具有优势。

Wang et al. (2018a) 将电磁时间反转技术 (Electromagnetic Time Reversal, EMTR) 应用到 VHF 宽带干涉仪定位中，基于阵列信号波达方向估计理论和时间反转原理，提高了闪电的先导-回击过程定位的时空分辨率和准确性，并对弱辐射源定位具有独特的优势。Wang et al. (2020a) 提出了一种雷电 VHF 干涉仪定位的多重信号分类算法，提高了放电过程的定位质量。Li et al. (2021a) 针对雷电 VHF 宽带干涉仪，开发了一种结合到达时间差技术 (Time Difference Of Arrival, TDOA) 和 EMTR 技术的雷电通道成像混合算法，称为 TDOA-EMTR，基于 FFT (Fast Fourier transform) 频谱分析去除每个时间窗口的低功率频率点，可以对辐射强度较弱的信号和雷电分支通道上同时产生的多个辐射信号进行有效定位，定位效率可提高 3-4 倍以上。Chen et al. (2022b) 分析了干涉仪系统对

近距离辐射源的定位误差，提出了对特定近距离辐射源定位误差的标定方法，当上行正先导初始阶段的仰角分别为 40° 和 60° 时，标定后的高程定位误差可分别减小约 11 m 和 20 m。Liu et al.(2020d)将波形相互交叉相关方法应用于 VHF 闪电探测中，在小的时间窗口（ $10\mu\text{s}$ ）中使用原始波形的希尔伯特变换和三步互相关解析方法计算时间差，使得闪电通道定位的连续性得到改善。

Sun et al.（2022）基于距离 10 km 的双站雷电宽带 VHF 干涉仪，提出了一种基于三角形交汇法的三维定位方法，图 2 是基于这种方法得到一次云闪和地闪混合型雷电的三维定位结果。三维定位效果在很大程度上取决于单站干涉仪的二维定位结果以及双站的同步时间精度。这种三维定位方法所需站点数少，可以作为雷电三维精细定位的补充。Yuan et al.（2023）提出了非共面天线阵列的定位算法，分析了时间不确定性对定位结果的影响，并提供了一种校准方法，在考虑角度不确定性的理论分布后，非共面配置可以显著提高地平线附近的高程不确定性和天顶附近的方位不确定性。

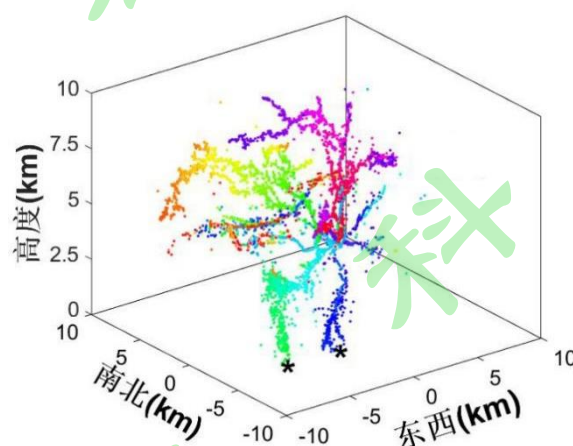


图 2 双站 VHF 宽带干涉仪二维定位结果交汇得到的一次双接地点地闪的三维定位结果，颜色代表时间演化，红色和紫色未开始的云内放电通道，蓝色和绿色为接地通道，黄色为结束阶段的云内发展通道，两个*号表示地闪的两个击地点。

Fig. 2 Three-dimensional positioning results of a cloud-to-ground flash which has two striking points, obtained by intersecting the two-station VHF broadband interferometer two-dimensional positioning results, the colors represent the time evolution, red and purple are the unstarted in-cloud discharge channel, blue and green are the grounding channel, yellow is the in-cloud development channel at the end stage, and “*” marks indicate the two striking points of the ground flash.

2.3 星载光学雷电探测技术

天基雷电观测可以在大空间范围连续观测，在人烟稀少的地区以及海上观测有独特优势，但由于星载探测通常是光学传感器，白天受到太阳辐射影响，而且观测距离远在几百甚至几万公里，因此探测效率的提高是一个重大挑战。

中国于 2016 年底发射的风云四号 A 星（FengYun-4A, FY4A）静止卫星搭载了包括雷电成像仪（Lightning Mapping Imager, LMI）在内的多个气象探测类仪器，LMI 是中国卫星历史上第一台用于雷电探测的仪器，可以连续监测中国地区的总闪活动，为强风暴的早期预警提供预警信息，在雷电探测领域和极端天气预警预报领域均具有重要意义。

Cao et al. (2021) 比较了 LMI 与国际空间站上搭载的雷电成像仪（Lightning Imaging Sensor on the International Space Station, ISS-LIS）所探测到的雷电光学特性和空间分布的差别，发现 LMI 虽然观测到的雷电次数少，持续时间短，但是密度峰值分布与 ISS-LIS 一致。Chen et al. (2021) 结合 BLNET 资料对北京地区的多对流过程进行分析发现，LMI 与 BLNET 所探测到的雷电空间分布基本一致，但是 LMI 探测到的雷电数量比 BLNET 少一个数量级，云层的遮挡对 LMI 的探测能力影响较大，但 LMI 在西部山区较地基雷电定位网具有较好的雷电探测能力。Liu et al. (2021b) 利用中国气象局地闪定位资料（CNLDN）与 LMI 资料进行对比，发现 LMI 探测效率对雷电流幅值有一定的依赖性，LMI 对孤立雷暴的水平定位误差约为 15 km。

LMI 根据雷电的光学瞬变特性进行雷电探测，而白天太阳光照较强，对 LMI 的探测效率有较大影响。Sun et al. (2021a) 利用在海南地区的地闪定位资料，系统评估了昼夜因素对 LMI 探测性能的影响，发现 LMI 白天探测效率比夜间低 20.4-35.5%，比雷电成像仪/光学瞬态探测器（Lightning Imaging Sensors/Optical Transient Detectors, LIS/OTD）和地球同步雷电成像仪（Geostationary Lightning Mapper, GLM）探测效率都要低，由于白天的背景辐射能量密度（Radiative Energy Density, RED）比夜间大的多，除了一些 RED 极强的雷电簇外，很多雷电有可能在数据处理时被滤掉。Chen et al. (2021) 对北京地区的分析也发现 LMI 在白天探测效率较低。Li et al. (2021c) 提出了一种新的移动放大匹配算法，同样也发现 LMI 在白天探测效率较低。

Hui et al. (2020a) 研究了青藏高原地区雷电的光辐射特征对 LMI 探测能力

的影响，发现青藏高原地区雷电的辐射弱、生命周期短和辐射区域小等特征，因此在高原上，LMI 雷电探测效率更低。但是 Zhang et al. (2020b) 结合全球雷电定位网（World Wide Lightning Location Network, WWLLN）对 LMI 探测效率的评估时发现，LMI 对于诸如台风等强对流天气的云闪探测效率和准确度均较高。

2.4 基于声信号的闪电定位技术

闪电发生时候不仅产生光、热及电磁辐射，还会产生雷声。由于声信号在传播过程中受障碍物阻挡会使信号失真，而且受干扰严重，因此以往研究使用较少。最近，Zhang et al. (2019a) 建立了一个基于声信号的闪电定位系统，由 19 个声音传感器构成，基于声音信号重建了闪电通道，与高速摄像对比发现，该系统与实际结果有较好的一致性，而且还能区分几乎同时发生的不同通道及分支。Wang et al. (2022) 发现回击的声信号由一个 N 型激波及随后的低频震荡波形组成，基于声信号重建的放电通道与光学图像一致。

2.5 雷暴云电场和气象参数探空系统

雷暴云电场探空是获取雷暴云内电场信息的最直接的手段。张鸿波等 (2021a) 研发了双金属球三维电场探空仪，并结合气象探空仪集成了雷暴电场—气象综合探空系统，实现了雷暴云内三维电场及温度、湿度的同步测量。张鸿波等 (2021b) 对华北平原一次雷暴穿云观测并结合地面大气电场、雷达回波等资料进行综合研究，给出了雷暴云内电场和电荷结构的分布特征，对一次中尺度对流系统（Mesoscale Convective System, MCS）层云区域内的电场探空发现，层云区内存在 6 个正、负极性交替的电荷区，并给出了电荷区的高度范围以及对应的温度层。

3 雷电物理过程和机制研究

得益于高时空分辨率探测技术的发展，可以更好的解析雷电各个阶段的物理特征。但是，自然雷电在时间和空间上具有很强的随机性，人工引发雷电以及高建筑物引发的雷电，为电流直接测量和近距离电磁场观测提供了条件。本节着重介绍对自然雷电先导、人工引雷以及高塔雷电三方面取得的成果。

3.1 基于高时空分辨率探测技术的雷电先导发展特征

3.1.1 雷电先导的发展传输特征

雷电先导传播的物理机制一直是雷电物理研究的一个最基本问题，雷电探测技术的发展使得对雷电的观测越来越精细和准确。

Qie et al. (2019) 综合使用高速摄像以及电磁场探测，总结并比较了火箭触发雷电和高塔触发雷电中正、负先导以及反冲先导的间歇性传播特征，进一步阐明了负先导以空间先导（空间茎）为特征的梯级发展方式且伴随的众多分支，正先导的梯级过程则与负先导有明显不同，其显著的特征是先导头部刷状电晕区的间歇性爆发增长和后部通道的亮度增强，观测还发现了一种与传统负极性相反的新型双向反冲先导。Jiang et al. (2020b) 研究了火箭触发雷电中上行的正、负先导的间歇性传播特征，发现正先导梯级发展传播时，存在明显的发光电晕结构，并提出了一种新的正先导传输的机制，正先导在传播过程中有独立的发光结构，该发光结构与正先导头部连接，导致了正先导的向前传播，这与负先导的传播机制类似，但是负先导头部附近的簇状空间先导会导致负先导在连接时产生众多分支，而正先导则常沿单个流光通道梯级传播。这种正先导梯级传输机制在 Huang et al. (2022) 的实验室长间隙高压放电实验中得到了证实，他们观察到了由独立发光结构引起的正先导传播以及在连接时的公共流光区，有助于更好的了解正先导传播的物理机制。

一般认为雷电在云内始发是以双向先导的方式发展，然而由于这种双向先导发生在云内，常无法进行光学观测。Yuan et al. (2019) 观测到一例产生于云底下方正先导通道附近双向先导的高时间分辨率的图像，双向先导两端具有不对称性，正极性端几乎没产生分叉，负极性端则产生多个分支且存在明显的梯级，速度也比正极性端要快，正先导侧向的双向先导负极性端与正先导主通道连接是正先导产生分支的重要机制。Jiang et al. (2022) 综合利用同步的高速摄像、快-慢天线、磁天线以及辐射源定位系统，研究了一次具有多个正先导分支从同一点向外延伸的独特云闪，研究发现正先导的向外传播经历了由稳定、平稳的通道延伸向活跃发展的转变，并伴随着频繁的反冲先导，正先导端大尺度的反冲先导显著促进了负先导的发展，负先导的进一步发展产生了规则脉冲簇序列。

3.1.2 正地闪特征及多回击产生机制

正地闪的发生概率小，但因为中和电荷量大而具有更大的危害，它的产生、发展、接地等阶段的特征与负地闪不同。Yuan et al. (2020b) 报道了由 BLNET 所记录到的一例罕见的正地闪，此次正地闪有三次回击，通过通道的三维成像定位发现，三次回击都发生在同一云闪通道下方，并通过云闪相互连接。第一次和第二次正回击都发生在水平的云闪负极性通道停止延伸时，而第三次正回击是发生在云中前进的负先导另一端的下方，表明回击前向下的正先导可能来自不同的衰变先导通道，或来自前进先导通道的另一端。Yuan et al. (2021a) 在研究一例正地闪时发现了两种来自水平负极性通道的不同类型的侧向击穿，熄灭的负分支的重新激活，从通道边缘由内向外击穿，并且击穿极性与原先通道建立过程相反，从而诱发了一次正地闪，负极性通道上，正先导的产生与主通道的断裂或电流截断无关。Wu et al. (2021a) 利用高速摄像和快慢天线，观测并报道了一例由水平先导附近出现的一系列双向先导形成的正地闪及产生机制。四次双向先导沿着同一路径依次发展，形成水平通道的正极性分支，并最终接地形成一次正地闪。在回击产生时，水平通道上还产生了类似“针状结构”的流光状细丝。几乎垂直于主通道的针状结构发生在回击的后期以及持续电流阶段，闪烁事件则是可以重复多次发生的反冲型流光（或先导），通道中的负电荷从正先导通道的核心径向发展到围绕通道核心的正电晕鞘是产生针状结构的原因，其径向电场相反（Wu et al., 2022）。

3.2 基于人工引发雷电的物理过程和电磁场辐射特征

自然雷电由于其时间和空间的随机性，在地面起伏不大的条件下很难确定雷电发生的时间和位置。人工引发雷电是指在合适的雷暴条件下，通过发射拖拽金属细丝的小型火箭，使得本来随机发生的自然雷电在时间和空间可控的条件下进行，便于近距离对雷电的各种物理特性，诸如电流、电磁辐射和高能辐射以及光学特性等进行测量。人工引雷火箭是人工引雷的核心技术，中国科学院大气物理研究所于 2008 年研发了火箭拖带金属线技术的专用引雷火箭（郄秀书等，2010），并由陕西中天火箭技术有限责任公司合作生产，目前该引雷火箭已经在我国雷电研究、气象、国防、林业等领域普遍采用（Jiang et al., 2020b; Fan et al., 2022; Li et al., 2018; Cai et al., 2021）。图 3 为在山东滨州建立的人工触发雷电实验（Shandong Triggering Lightning Experiment, SHATLE）基地和引雷

成功的照片。



图3 位于山东滨州的人工触发雷电实验（SHATLE）基地（左）和引雷成功的照片（右）。

Figure 3. Shandong Triggering Lightning Experiment (SHATLE) base which in Binzhou, Shandong Province (left) and photos of successful lightning triggering (right).

3.2.1 人工引发雷电的物理过程

Li et al. (2020b) 基于 VHF 干涉仪定位等资料，分析了人工触发雷电初始阶段的导线破坏和等离子体通道重建过程，重新连接过程类似于先导/回流过程，而企图重新连接过程更复杂。由于导线的不均匀性被气化为一系列导线残留物，然后 VHF 击穿向下发展数百米，随后发生类似反冲的事件，两者的 VHF 辐射都很弱且无可探测到的 LF 电磁场变化，表明没有显著的电流或电荷流动。

Li et al. (2021b) 利用 VHF 雷电干涉仪对初始连续电流期间发生两次电流极性反转（负-正-负）的人工引发雷电进行研究，发现上行正先导的发展产生负极性初始连续电流，在已冷却正先导分叉通道上始发的反冲先导偏离原有正先导通道并转变为击穿空气的负梯级先导，其与云内其他正先导通道同时发展。快速击穿过程于接地主通道始发并沿原有正先导通道向该负先导后端发展，使得雷暴云中正电荷通过负先导通道对地传输，导致雷电通道底部电流极性快速反转为正极性；随着负先导终止发展而其他正先导分叉上持续放电，使得雷电通道底部电流极性逐渐重新转变为负极性，参与双极性雷电放电的正、负极性电荷区水平分离，分别位于雷暴云的对流区和层云区（唐国瑛等，2020）。

Ma et al. (2020) 发现 M 分量在电流峰值、上升时间、半峰值宽度和电荷转移量比初始连续电流脉冲表现出更明显的脉冲特征，在两种特殊情况下，长时间初始连续电流和连续电流期间发生的多次 M 分量浪涌电流，有利于保持放

电通道的导通以及云内放电通道的延伸，从而延长初始连续电流和连续电流的持续时间，但降低了此后发生回击的概率。结合 VHF 辐射源定位以及电场变化等，提出了 M 分量新的产生机制，即向上回击的短暂中断以及主通道内剩余电荷促进击穿重新激活也可产生 M 分量。Li et al. (2020a) 对人工触发闪电一次 5.4kA 峰值电流的 M 分量进行了分析和模拟，发现在远距离电场变化上呈现出微秒时间尺度的脉冲。Cai et al. (2022b) 研究了人工触发闪电中的连续电流特征和 M 分量特征参量，发现没有 M 分量的连续电流持续时间小于 10 ms，远小于有 M 分量的连续电流，首个 M 分量出现在回击之后的 4 ms 内。

根据高速摄像和电场资料，Cai et al. (2022a) 将一次空中引雷中的直窜先导分为常规直窜先导、具有追逐先导的直窜先导和具有双向先导的直窜先导，并使用分段速度源电荷模型模拟了常规直窜先导的电场变化。Pu et al. (2019) 利用同步电场变化、高灵敏度 VHF 辐射源定位成像、通道底部电流以及高速摄像等综合观测资料，对人工引雷直窜先导阶段发生的不规则脉冲序列序列 (CPT) 研究发现，CPT 均发生于先导接地前 150 μ s 内，是一个从中低频直到可见光频段辐射全面增强的现象，先导的电荷量与速度的乘积 QV 可以作为衡量 CPT 强度的代理指标。Cai et al. (2021) 研究了有、无回击人工触发闪电之间的差异，认为无回击的触发闪电在电流重新建立之前有一个长达几毫秒的明显无电流寂静期，然后在向上正先导和地之间重新建立一个相对较大的振幅和类似于回击电流的快速上升时间脉冲；而具有回击的触发闪电在初始电流变化中没有电流寂静期，导线破坏和等离子体通道重建过程的电流脉冲类似于 M 分量脉冲，具有较小的振幅和缓慢的上升时间 (57 μ s 以上)。较强的初始阶段之后通常是回击。

Liu et al. (2020c) 对一次击中 30 m 高通信塔的火箭触发雷电独特连接过程进行了研究，下行先导在与通信塔的连接过程中，出现了一个 S 形连接通道，连接通道长度几乎是直连通道的 2 倍。向下的负先导和向上的正极性连接先导互相错过约 4.1 m 后，再水平转向最后连接，通过背景电场的模拟认为可能是因为具有发散特征的先导流光/电晕区导致的连接方向不确定性所致。Li et al. (2018) 利用一套改进的 VHF 定位系统，结合高速摄像，研究了在人工触发闪电的回击阶段闪电辐射源的变化过程，发现触发闪电三维回击速度的非单调变

化。

3.2.2 雷电近距离电磁场辐射特征及影响

Fan et al. (2019) 利用山东和广东人工引雷实验中的电流和磁场资料, 研究了初始连续电流阶段的 LF 磁场脉冲爆发, 脉冲源自上行先导头部附近的空气击穿, 平均脉冲峰值电流在千安量级。附近站点的磁场呈现缓慢变化, 其上叠加有小脉冲, 磁场脉冲爆发预示着电荷转移和通道亮度的增强。Fan et al. (2020) 进一步扩展磁场传感器带宽, 在广东的人工引雷实验中观测发现, 在向上行正先导的整个持续时间内存在微秒级的磁脉冲辐射, 表明在触发闪电的初始阶段, 上行正先导以梯级式传播, VHF 辐射发生于每个磁脉冲的开始阶段, VHF 辐射产生于梯级过程米级尺度的空气击穿过程对应的电流脉冲。对空中触发闪电 LF 磁场的微秒时间分辨率测量发现, 由上行正先导和下行负先导构成的双向先导以不对称方式发展, 在持续传播阶段, 下行负先导的梯级比上行正先导的梯级要频繁得多 (Fan et al., 2022)。Chen et al. (2022c) 详细分析了由上行弱正击穿和随后的下行强负击穿产生的前驱电流脉冲, 发现前驱电流脉冲对应上行正先导的自持发展。Li et al. (2021d) 研究了正极性人工触发闪电中的上行负极性先驱放电脉冲, 认为这些前兆脉冲来自上行先导的非持续发展阶段。

Li et al. (2019) 在人工触发雷电通道附近安装低频磁传感器, 用于探测雷电通道附近的地下磁场。通过比较地下 2 m 和地上 1 m 处的磁场, 发现地下空间可以探测到上行先导辐射的微秒级磁脉冲, 并且磁信号受到土壤介质的影响, 地下 2 m 处的磁场幅度衰减超过 55%, 地下磁脉冲峰值延迟了约 $0.6 \mu\text{s}$, 磁场中高频分量衰减更快。

3.3 基于高建筑物的雷电放电特征及连接过程

当雷暴天气发生时, 相对于地面及低矮建筑物, 高大物体, 诸如高塔、高压线塔、高楼大厦等, 因为顶部较高导致电场畸变, 更有可能先达到空气击穿电场阈值, 不仅可能引发上行雷电, 也容易因产生上行迎面先导而被下行雷电所击中。上行雷电的发生概率随着建筑物的高度增加而增加, 因此高大的建筑物为观测和研究上行雷电提供了重要平台。

3.3.1 高塔雷电的雷电放电特征

当建筑物足够高时, 上行雷电的发生概率大大增加, 并且高塔周边发生的

正地闪也会促进上行雷电的形成。Wu et al. (2019a, 2019c) 分析了两次峰值电流达+141 kA 和+310 kA 的强正地闪触发的高建筑物上行雷电，两次强正地闪均有长连续电流阶段，通过雷电通道成像仪以及高塔附近的电场变化分析发现，中和大量正电荷的正地闪回击过程以及之后的云内 K 过程，可能由云内负先导朝高塔方向快速延伸，造成塔顶局部区域的电场发生突变，最终导致上行雷电发生。Yuan et al. (2021b) 利用 BLNET 以及高速摄像系统拍摄的雷电资料，对 2012-2020 年发生于 325 m 气象塔始发的 25 次上行雷电进行观测，发现上行雷电与正地闪有密切联系，其中 21 次上行雷电由附近正地闪所触发，正地闪后短时间内 (<2 ms) 触发的上行雷电与高塔上方已经熄灭的先导分支的重新激活相关，而正回击后延迟长时间 (5-187 ms) 触发的正地闪，则与正地闪长连续电流期间负先导延伸至高塔上方区域有关。

高塔上行雷电通常由强正地闪触发，但 Jiang et al. (2021b) 在广州高筑物群的雷电观测中，发现一例由上行负地闪引发的下行正地闪，这可能是一种新的正地闪产生机制，上行负地闪产生后，促进了一系列的云内放电，云闪通道将雷暴云中远处的正电荷输送到已有的通道区域，并由一次云闪产生的分支向下接地产生正地闪。Fan et al. (2021b) 发现高塔上的上行先导之前，电场和磁场的变化均较小，脉冲的持续时间和脉冲间隔均与火箭触发雷电相似，高塔上行雷电的上行先导通道在初始几毫秒内发展迅速，比火箭引发的雷电快一个数量级，表明高塔上始发的上行先导得益于塔尖附近的电场显著增强，但在上行先导发展过程中电场会迅速降低，导致上行先导速度下降。上行先导通常伴随着初始连续电流，而上行先导通道或回击通道会逐渐冷却，反冲先导可能会发生于冷却熄灭的通道中。但反冲先导通常在云内产生，由于云层遮蔽，使得光学探测极为困难，其形成机制至今仍不清楚。Wu et al. (2021b) 发现一例正地闪的双向先导发展时，双向先导在已有通道突然伸长，其下端（正端）接地诱发了一次正极性回击。Srivastava et al. (2019) 利用 $2.7 \mu\text{s}$ 时间分辨率及 1 m 空间分辨率的高速摄像捕获了发生于 325m 气象塔上的一次自然雷电过程，统计了下行负先导 38 次梯级过程以及 34 次空间先导，发现正、负先导的间歇性梯级前进行为表现出不同的特征，说明他们的发展是相互独立的。但当下行负先导和上行连接正先导非常接近时，下行负先导可以通过增强总电场来诱导和支持

上行连接正先导的发展。

Chen et al. (2022a) 使用罗氏线圈对广州塔上发生的上行雷电电流进行了直接测量, 结合回击光强度和雷电定位系统, 分析了三次单回击下行负地闪和两次多回击上行负地闪, 给出了上行雷电放电电流波形的上升时间、半峰值宽度, 波形特征等相关信息, 并且发现在同一次上行雷电中, 最大峰值电流与随后几次回击的初始峰值光强之间存在近似的平方关系, 发现雷电定位系统的峰值电流被高估。Jiang et al. (2020a) 模拟了下行负地闪先导的发展过程, 研究了建筑物不同高度情况下, 对下行负先导和上行连接先导的产生、发展以及雷击点分布的影响, 发现高度越高, 雷电击中的概率越大, 并可能吸引周围的雷电被击中高塔, 这意味着高塔对周围建筑物有一定的保护作用, 但保护距离会随建筑物高度降低和距离增加而减小。

3.3.2 高塔雷电连接过程的物理特征

雷电的连接过程决定了雷电所击中的位置, 也是雷电可能带来危害最大的区域, 因此对于雷电连接过程的研究至关重要。高建筑物易遭受雷击, 使得对雷电连接过程的高精度观测成为可能。Jiang et al. (2021a) 使用 380kfps 的高速摄像观测到了发生在 325m 气象塔上一次自然雷电连接过程时击穿阶段的精细结构, 当正负先导头部发光部分相距 $\geq 23\text{m}$ 时, 会形成公共流光区。在击穿阶段期间正、负先导距离减小, 开辟了一条从高阻抗公共流光区到热等离子通道的新路线, 该路线可能在公共流光区最初形成时就已经由接近先导的流光确定。Qi et al. (2019) 使用 20 和 525 kfps 帧率的高速摄像机拍摄到了一例自然负地闪的连接过程, 分析了 47 次下行负先导梯级过程中的 12 个空间电荷柱/先导的二维长度信息, 同时也对下行负先导和上行正先导的平均步间距、步长和二维速度进行统计分析, 发现最后一跳即 BTP 的二维长度约为 13m。

Qi et al. (2020) 统计了 2012-2018 年间发生于广州塔 (600 m) 和广晟国际大厦 (360 m) 共计 21 次负地闪, 发现更高的建筑物上雷电的闪击距离更长, 对于一定高度的建筑物, 闪击距离有随着回击峰值电流增强而变大的趋势, 且建筑物越高, 对应的回击峰值电流也越强。对广州高建筑物群 (100-600 m 范围) 54 次雷电的首次回击二维距离的进一步分析发现 (Qi et al., 2021), 接闪器的高度和建筑物顶部几何形状是影响放电稳定性的重要因素, 不同建筑物上的上

行连接先导发展速度较为接近，但建筑物顶部形状较为简单时大多只有 1 个上行先导（87%），而顶部复杂的建筑物只有 1 个上行先导则很少（26%）。

4 瞬态发光事件及对雷暴对上层大气的影响

对流层雷暴活动和所发生的雷电会在雷暴上方大气诱发瞬态发光事件（Transient Luminous Events, TLEs），这种扰动可高达电离层。我国自 2007 年以来就开始持续对 TLEs 进行观测研究，近年来，对 TLEs 与母体雷电和母体雷暴的关系有了新的认识。此外，还研究了地球伽马射线闪与雷电的关系，以及雷暴对于电离层电子密度的影响。

4.1 雷暴上方瞬态发光事件

雷暴诱发的中高层瞬态发光事件包括红色精灵（Red Sprite）、淘气精灵（Elves）、蓝色喷流（Blue Jet）、蓝色启辉器（Blue Starter）、光晕（Halo）和巨型喷流（Gigantic Jet）等。

4.1.1 红色精灵

红色精灵是最早被人类观测到的中高层大气瞬态发光事件，同时也是在地面最容易被观测到的一种类型，并常伴随有光晕产生。Yang et al. (2008) 首次在大陆地区开展探测并获得 17 次红色精灵；随着探测技术发展和组网观测，陆续对不同地区的 TLEs 分布以及与母体雷电和雷暴的关系开展了研究，大多数 TLEs 产生于中尺度对流系统。Wang et al. (2019c) 对红色精灵双站交汇定位，发现其产生于 MCS 层云区域上方，与母体雷电的水平偏移小于 50 km。红色精灵一般在 MCS 成熟阶段的层云区上方或消散阶段的弱对流区发生（Huang et al., 2018；王庸平等, 2019；王子健等, 2020；钟丽华等, 2020）。

发生红色精灵的母体雷暴中一般红色精灵的数目在几个到十几个之间（钟丽华等, 2020）。对于负极性红精灵的母体雷暴特征，Yang et al. (2018a) 观测发现负极性红色精灵在母体雷暴的强对流阶段产生，正极性红色精灵主要在雷暴层云区上方产生，并且认为雷暴中高层的强对流以及相当大的风切变为负极性红色精灵产生提供条件。

现有的地面观测表明，绝大多数红精灵与正地闪有关，而只有非常小的一部分（<1%）的红精灵是由负地闪产生的，但负地闪的数目却远超过正地闪，两者数量比在 10:1，存在“极性悖论”。红色精灵极性分布存在海陆差异，相比

于陆地雷暴，海洋雷暴更有利于负精灵的产生（Wang et al., 2021f; Lu et al., 2022b）。Zhang et al. (2022d) 利用机器学习对卫星观测到的 1522 例红色精灵个分析发现，全球负极性红色精灵占比约 17%，但随纬度和海陆分布而变化。

Wang et al. (2021g) 发现负极性红精灵的 VLF 磁场波形中出现了不同寻常的精灵电流特征，与红色精灵中电流的光辐射具有良好的对应性。Wang et al. (2021g) 试图从母体雷暴和局部电离层不规则性的角度揭示这一非典型事件的可能原因，但得到的答案仍然是在回击后电荷向地面转移的超长持续时间。

张金波等 (2019) 研究了由于重力波导致的中高层大气密度不均匀对红色精灵和光晕的始发位置以及光辐射形态的影响，并模拟发现在重力波波谷位置空气更易击穿，故此时红色精灵和光晕更易始发。同时，红色精灵和光晕的强发光区分布于重力波波谷，波峰位置发光强度相对较弱，并且重力波扰动幅值越大对红色精灵和光晕光辐射形态影响越大，然而对流层雷电越强烈，则红色精灵和光晕的发光强度对于重力波波形的依赖越小。Ren et al. (2019) 认为连续电流期间的电荷转移维持了红色精灵的持续发光，并伴随光晕的出现。

4.1.2 巨型喷流

巨型喷流是一种发生在雷暴上空的大型瞬态放电，可直达电离层下部，建立了雷暴和电离层之间的直接电连接。与其他类型的中高层放电现象相比，巨型喷流的发生概率很低 ($<1\%$)；此外，由于巨型喷流光辐射以蓝光为主，而蓝光在大气中传输衰减严重，因此巨型喷流在地面观测难度较大，认识还比较有限。Yang et al. (2018b) 观测到一次中纬度地区中尺度对流系统发生的巨型喷流，并在其附近 15 分钟内还同时记录到两次红色精灵，巨型喷流可能始发于对流线前面的弱回波区，最大回波顶高低于相同区域的对流层顶高度，这与以往所认为的夏季巨型喷流通常产生于强对流过冲明显不同，探空结果表明可能是 MCS 内较大的中高层风切变为巨型喷流的产生创造了条件。

近年来随着精灵爱好者的加入，在全国范围了获得了许多高质量的观测图像，包括产生上百次红色精灵的雷暴过程，丰富了 TLEs 观测资料。Yang et al. (2020) 综合分析了由两位天象爱好者于广东石坑崆和湖南嘉禾县同时观测获得到的双站巨型喷流同步观测资料，三角定位计算结果表明，石坑崆拍摄距离约 37 km，是目前巨型喷流最近距离的观测结果，也是迄今为止最清晰的光学图

像；巨型喷流与云顶连接部分和红色最亮部分的高度分别为 20.6 ± 1.7 km 和 46.4 ± 0.6 km；母体雷暴发展旺盛，巨型喷流发生于强对流区附近、云顶亮温最小值区，其附近出现有对流过冲现象；在巨型喷流前后 30s 内发现三次+NBEs，发生高度为 11-13 km，对应雷达反射率因子 30-35 dBZ。NBE 可能是巨型喷流发生的初始事件。

迄今为止，国际上观测到的巨型喷流大多数为负极性（将负电荷传输到电离层），而正极性巨型喷流的观测事例比较缺乏。He et al. (2019) 根据光学观测、雷电定位及天气雷达等综合资料，发现一次正巨型喷流底部和顶部高度分别为 52 ± 4 km 和 89 ± 6 km。母体雷暴相关环境参数值与普通夏季雷暴无明显差异。巨型喷流发生前后，云内上升气流很强，对流发展旺盛，雷暴单体存在过冲现象。雷暴以负地闪为主。

4.1.3 蓝色喷流

蓝色喷流也是始发于雷暴顶部向上发展的一种瞬态发光事件，但最大高度约为 40-50 km 左右，明显区别于巨型喷流。Liu et al. (2018) 发现在蓝色喷流事件 1ms 时间窗口内均有负极性 NBE 发生，并且每次蓝色喷流的前 6s 内都有负地闪发生，从而建立了蓝色喷流与负极性 NBE 的物理关联，负极性 NBE 很可能是蓝色喷流事件的云内始发过程。Liu et al. (2021e) 报告了两次产生 13 例蓝色喷流并伴随红色精灵的中纬度雷暴，发现蓝色喷流均发生在雷暴最冷的云顶 (-195 K) 附近，聚集在导致雷暴云顶过冲的对流涌附近，伴随着负极性 NBE 爆发性发生，高度约为 16-18 km；表明雷暴云顶过冲和强上升气流导致形成一个强而高的上部正电荷层，有利于向上产生正蓝色喷流，对认识云顶放电的产生机理和气象条件提供了新的视角。

Liu et al. (2021) 进一步利用搭载在国际空间站上的大气-空间相互作用光学探测器 (Atmosphere-Space Interactions Monitor, ASIM) 结合地基探测对我国华南地区强雷暴分析，发现了一类特殊的云顶-NBE，伴随着蓝色 337 nm 光谱辐射，但没有普通雷电的 777.4 nm 辐射，明显区别于普通雷电的光学特征，表明 NBE 独特的流光发展特性，-NBE 峰值电流强度和蓝色光学信号峰值紧密相关。

Xu et al. (2023) 利用 ISUAL 卫星资料研究了青藏高原上空发生的 TLEs，尽管青藏高原对流系统相对较弱，雷电强度较小，但在青藏高原东南部仍然发

现了淘气精灵, 红色精灵和光晕, 主要发生在 8 月和 9 月。在同一纬度带的长江三角洲地区, 春季的 TLEs 发生率大于夏季和秋季。8 月份所有研究区域都经常观测到光晕, 而蓝色喷流只出现在长江三角洲上空。高原东部发生的淘气精灵数量最多, 与长江三角洲相似, 但比东海上空要少。与长江三角洲和东海相比, 高原上产生 TLE 的雷电平均峰值电流更大, 是否与电离层特性、地形特征对雷电的影响等有关值得进一步探讨。

4.2 地球伽马射线闪

地球伽马射线闪 (Terrestrial Gamma-Ray Flash, TGFs) 是起源于地球低层大气短暂而强烈的高能光子爆发, 与雷电和雷暴具有密切联系, 是当前大气电学和高能物理等领域关注的国际前沿问题。近年来, 借助天基 (如我国慧眼卫星、极目卫星和美国 Fermi 卫星、RHESSI 卫星以及欧空局搭载于国际空间站的 ASIM 等) 和地基雷电探测, 我国学者也开展了一系列研究。Lu et al. (2019) 对比研究了北美和东亚地区的 TGF 时空分布, 结合雷电天电信号测量发现, TGF 与云闪向上发展的负先导过程有关, 在 VLF 磁场信号上表现出约 2 ms 的慢变化信号。Zhang et al. (2020d) 首次报道了赤道地区 TGF 对应的雷电 VLF 磁场特征, 发现了迄今为止距离 TGF 卫星观测最接近的雷电信号 (<28 km); 利用雷电脉冲单站三维定位进一步发现, TGF 发生于云闪负极性先导向上发展期间, 距离雷电起始约 3-5 ms, TGF 对应云闪最强的放电脉冲, 发生高度约为 10-11 km。Lyu et al. (2021) 分析发现 TGF 与特殊的云内放电过程, 即高能云内大脉冲事件 (Energetic In-Cloud Pulses, EIPs) 同时发生。

Zhang et al. (2021) 基于大观测样本发现了一类特殊的 TGF, 其光子信号均先于 NBE 发生, 领先时间为 0.06-13.5 ms, 并且在 TGF 之前的 20 ms 内未发现其他快速先导放电, 其中 7 例与 +NBE 相关, 发生高度 8.6-11 km, 2 例与发生位置更高的 -NBE 相关; 这类 TGF 包含更多的光子, 持续时间长, 且能谱较硬, 明显区别于与云闪先导过程相关联的 TGF, 证实了 TGF 形成机制中的第二种情形是存在的, 即 TGF 主要由大尺度的背景雷暴强电场作用产生, 不需要雷电放电过程, 支持逃逸击穿正反馈机制, TGF 可能为后续发生的 NBE 提供了有利条件。

Zhang et al. (2020d) 对产生 TGF 的母体雷暴特征进行分析发现, TGF 通常发生在雷暴发展的成熟阶段, 而且往往在较强但不是最强的雷暴对流区域中。

Xian et al. (2021) 发现产生TGF的亚热带雷暴在对流层较温暖，并且在陆地上的对流层比海洋上的对流层更冷、更高，产生TGF的热带雷暴在热力结构上没有明显的陆海差异。

4.3 雷暴对电离层 D 层和 E 层物质含量的影响

对流层大气与电离层之间存在耦合，对流层雷暴和雷电对上方的电离层也产生显著影响。此前已经发现中纬度地区对流层雷暴可以通过重力波或雷电电场等引起低电离层的扰动，但低纬电离层通常存在非常复杂的扰动变化过程，由于瑞利-泰勒不稳定性产生等离子体泡，引起低纬电离层不规则性变化，导致信号提取难度大，对流层雷暴对低纬电离层的影响以及这种影响的水平尺度仍然有很大的不确定性。Ogunsua et al. (2020) 利用地基全球雷电定位观测，并结合 GPS 接收站实测的电离层电子总含量 (Total Electron Content, TEC) 资料，采用多项式滤波等方法，发现在全球雷电最活跃的赤道地区刚果盆地，对流层雷暴导致的电离层电子含量变化从雷暴发生位置向特定方向传播，电子含量变化偏差的峰值可达 ± 1.5 TECUs 左右，雷暴诱发的重力波周期在 16-76 min 之间。赤道电离层内部的动力学在白天受雷暴活动的影响被抑制，而夜间因电离层内部存在的等离子体泡等引起 TEC 大幅变化，雷暴引起的重力波影响可以忽略。

Yu et al. (2019) 利用钠激光雷达观测雷暴上空中性金属原子和金属离子的变化，发现电离层 E 层增强，潮汐相位下降，中间层中性 Na 数密度增加 600 cm^{-3} ，以雷暴上空的中间层和电离层动力学和化学耦合过程建模，将电离层观测值作为输入，模拟得到的增强 Na 层与 Na 激光雷达观测值一致，推论雷暴上空金属层状现象的增强与大气潮汐有关，是对流层-中间层-电离层耦合的结果。

5 雷暴云电荷结构的观测和数值模拟

5.1 雷暴云内的电荷结构

雷暴云中不同相态水凝物粒子在动力场和微物理场的共同作用下，主要通过非感应起电机和感应起电机携带净正、负电荷，从而在云中形成正、负交替分层的电荷分布结构，局部电场超过空气击穿阈值时将激发雷电发生和传播。对雷暴云中的电荷分布的研究从观测和数值模拟两个方面开展。

基于观测的雷暴云电荷结构研究通过电场探空和雷电辐射源定位两种途径来实现。电场探空可以观测三维或垂直电场，进而解算出探空路径上的云中电荷分布。张鸿波等（2021b）利用三维电场探空对一次处于减弱阶段的雷暴进行观测发现，雷暴层云区存在 5 个极性交替的电荷区，自上至下分别为：云顶附近的弱负极性屏蔽电荷区、主正电荷区、主负电荷区、正电荷区及最下方的弱负极性电荷区，反映出雷暴云电荷分布具有复杂性和时空不均匀性。

雷电辐射源定位虽然只能指示参与雷电放电的电荷区域，但是突破了探空路径的局限性，Liu et al.（2020b）发现一次暖云降水为主的暴雨系统中，雷电多集中分布于对流较弱、降水强度较低的地区，在空间上与电荷的起源地分离，进而提出在对流较弱的雷暴中，由于起电速率低于电荷从源区向外转移的速度，起电区的电荷密度较低，而荷电的降水粒子可能在其他区域聚集，从而导致相同极性电荷的不均匀分布，并在远离电荷源区的局部区域产生更多雷电。Zheng et al.（2019）认为除环境温度外，对流强度也影响电荷结构，对流强度低时冰相粒子集中在低空，主要电荷区位于-10℃等温线附近，且冰晶和雪晶是主要水成物粒子，它们之间的起电影响可能决定云内的电荷分布；对流强度大时，冰相粒子可以被输送到高空，在高空和低空均形成主电荷区；随时间演变，雷暴对流强度减弱导致上部和中部主电荷区下降，下部正电荷区消失。

数值模拟也是研究电荷结构的重要手段。Xu et al.（2019）分别使用基于液态水含量（Liquid Water Content, LWC）和霰雾凇吸积率（Rime Accretion Rate, RAR）的两种非感应起电方案，模拟发现基于 RAR 的方案在对流区出现反三极性结构，其中在-20℃层以上出现强上升气流、高 LWC 和高 RAR 区域，是产生上部正电荷区的环境条件。Lu et al.（2022a）发现单体合并对电荷结构有明显影响，合并过程中，云内雷电分布由典型的三极性电荷结构演变为正、负交替的五层电荷结构，最上层为弱正电荷层，单体合并导致的不同极性电荷区之间的距离减小可以增强雷电活动，Chen et al.（2019a）针对超级单体的模拟也得到了类似的结论。廉纯皓等（2020）模拟发现雷电的放电过程会影响雷暴云中的电场，从而影响水凝物的下落末速度，反过来对动力结构、降水和微物理特征产生相应影响。Xu et al.（2020）探究了融化起电机制对飚线层云区电荷分离

的潜在贡献，发现雪的融化有利于层云区 0°C 等温线以下形成正电荷层，霰的融化有利于对流区 0°C 等温线以下形成正电荷层。

5.2 高原雷暴结构和雷电特征

青藏高原是地球上海拔最高、面积最大的高原，夏季雷暴频繁发生，不仅影响亚洲季风环流，而且是近地表物质输送进入平流层进而影响全球气候的重要通道。

Zheng and Zhang (2021) 利用热带降雨卫星 (Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM) 资料，发现高原上的雷暴雷电率和雷暴大小呈正相关。他们对比高原雷暴、中国中东部雷暴和喜马拉雅山南麓雷暴，发现高原雷暴中的弱对流导致在雷暴大小相近的情况下雷电率较小，有效起电区较小。Qie et al. (2022b) 发现青藏高原东部的雷暴中雷电发生最多，对应冰相粒子含量、云顶高度、体积对流降水率最大。东部高原冰相粒子含量与雷电活动具有相似的季节变化，而中部和西部的狭长对流也是影响雷电活动的重要因素。青藏高原复杂的地形也可能对雷暴云的结构和强度产生调节作用。

Wang et al. (2019a) 基于数值模拟发现，青藏高原独特的弱对流和低冻结高度环境条件可能是三极性结构中出现底部大正电荷区的原因，底部正电荷区主要由带正电荷的霰和云滴组成，即使在上升气流弱时，低冻结高度也可以形成冰相粒子，从而形成三极性结构中较低的反偶极子；弱对流使上方偶极子的起电减弱，下方偶极子的起电过程没有明显变化，相对而言下方起电更为突出。高原雷暴中感应起电的作用不可忽视，携带正电荷的霰粒子中 50% 以上的正电荷由感应起电机提供，显著提高了中部主负电荷中心和底部大正电荷中心，略微降低了上部正电荷中心。郭凤霞等 (2018) 对一次高原雷暴过程进行模拟，发现高原雷暴整体电荷密度较小，主要为三极性结构，消散阶段由于霰粒子下落固态降水增强，电荷结构转变为偶极性。在三极性电荷结构分布中主正电荷区与主负电荷区深厚，上部正电荷区由携净正电的冰晶构成，中部负电荷区由携净负电的霰粒子构成；下部正电荷区具有较大的空间范围和持续时间，但是电荷密度更小，由携净正电的霰粒子、雪粒子共同构成。偶极性结构的下部负电荷区主要由携带净负电的霰粒子构成。孙凌等 (2018) 基于 WRF-Elec 模式，在 NSSL 云微物理双参数化方案中增加电场力对霰、雹粒子降落末速度的影响，

研究发现雷暴云发展旺盛阶段，电场力通过对霰、雹粒子降落末速度的调整，增强了雷暴云内感应、非感应起电率，电场力对雷电活动的作用为正反馈，电场力对雷暴电荷结构的反馈作用不可忽略。

5.3 气溶胶对雷暴云起电和雷电的影响

气溶胶可作为云凝结核影响云内微物理过程，从而影响云内起电和电荷结构分布，进一步影响雷电活动。但整体来讲，雷电和气溶胶的关系是复杂的，已有的一些研究还有很大的不确定性。

孙萌宇等（2020a）对雷暴当天的雷电活动和雷暴发生之前的大气气溶胶浓度相关性研究表明，污染大气背景下雷电峰值出现的时间晚于清洁背景下。在相对干净的大气背景下，总闪数与 PM2.5 浓度存在明显正相关，此时气溶胶可能通过促进云微物理过程影响对流发展，增强雷电活动；在相对高污染条件下总闪数随 PM2.5 浓度的增加呈减少趋势，可能的原因是高气溶胶浓度下地面太阳辐射显著下降，对流活动受到抑制，导致雷电活动减少。Zhao et al.（2020）发现由于高原地区气溶胶浓度低，盆地地区气溶胶浓度高，因此雷电密度与气溶胶在高原地区呈显著正相关，在盆地地区呈显著负相关。Shi et al.（2022）发现在四川盆地西北部，气溶胶光学厚度与地闪的相关系数为 0.64，明显大于西南部。Sun et al.（2023）对北京一次沙尘雷暴事件进行了分析，发现正地闪比例很高，沙尘气溶胶增加可以影响雷电活动。

Sun et al.（2022）利用耦合了详细起电和整体放电方案的 WRF（Weather Research Forecasting）-Elec 模式，对北京城区发生的一次多单体雷暴过程进行模拟试验表明，气溶胶浓度的增加促进了雷暴云微物理过程的发展，产生更多的冰晶和粒径更大的霰粒，非感应起电过程增强，最终导致雷电增多。Sun et al.（2023）进一步研究了不同环境热动力条件下气溶胶对雷暴云微物理、起电以及雷电活动的影响，认为在低对流有效位能（Convective Available Potential Energy, CAPE）环境中，尽管冰晶含量较低，但气溶胶浓度的增加，使半径增大的霰粒与其他冰相粒子之间有更高的碰撞效率。林晓彤等（2021）的模拟结果认为，水汽质量可通过影响冰相粒子增长速度对气溶胶效应产生影响，充足的水汽保证了霰和冰晶的增长，形成更多冰相粒子，非感应起电过程增强。

海洋与陆地的雷电特征不同，对于在相似气象条件下产生相同雨量的对流系统，海洋上平均雷电频数通常比陆地上小得多。Liu et al. (2020a) 认为从热力学的角度考虑，清洁背景下海洋上对流更强，雷电活动应更剧烈，但实际观测表明污染条件下平均雷电密度是清洁条件下的 3.7 倍。他们认为气溶胶促进了混合相的发展。Pan et al. (2022) 根据尺度大小将海洋上气溶胶分为细气溶胶和粗海盐气溶胶，发现海洋和陆地的气溶胶差别主要在于海洋上粗海盐气溶胶较多，这导致海洋上深对流略少于陆地，将海洋粗海盐气溶胶固定在低水平，改变细气溶胶数浓度后雷电的增加量远大于陆地；将海洋粗海盐气溶胶固定在高水平，改变细气溶胶数浓度后雷电增强较少，即虽然细气溶胶增强了雷电密度，但是粗海盐气溶胶会抑制混合相的发展，因此海洋上可以减少 90% 的雷电活动。Liu et al. (2021d) 发现野火季节，陆地上发生的雷电增加了 73%，海洋上发生的雷电增加了 270%，在热力学参数不利于海洋上产生较多雷电活动的情况下，气溶胶在海洋上空增加的小尺度冰相粒子，可以促进混合相微物理的发展，进一步增加雷电活动。

此外，Wang et al. (2021e) 指出雷电发生时也可以产生超细气溶胶颗粒，雷电导致成核气溶胶和爱根核模态气溶胶分别增加了 18.9 倍和 5.6 倍，并且雷电发生后硝酸盐气溶胶显著增多。使得气溶胶对雷电的作用更加复杂。

6 强对流天气的雷电特征与预报

雷暴系统中动力结构、微物理过程和雷电活动密不可分并相互影响，由于不同雷暴系统中的动力和微物理特征不同，导致云内电荷结构和雷电活动呈现出明显的差异，而雷电也能在一定程度上反映对流的发展强度和趋势，并对动力和微物理场产生反馈。

6.1 MCS 的雷电活动

MCS 常伴随强降水、大风、冰雹和频繁的雷电。Liu et al. (2021a) 按照雷达回波的形态特征将线状 MCS 分为 6 类，分别为前部对流后部层云区 (TS)、前部层云后部对流区 (LS)、前部对流没有层云区 (NS)、弓状回波 (BE)、对流线与层云区平行 (PS) 和破碎线性层状云 (BL)，在北京地区 TS、LS 和 PS 三种线状 MCS 占总量的 73%，在其成熟阶段，雷电集中分布在雷达反射率高的对流区，到消散阶段对流区雷电数量急剧减少，层状区雷电数量逐渐增加。

Xia et al. (2018) 将 MCSs 根据其高/低对流降雨率 (HR/LR) 和高/低地闪频数 (HL/LL) 分为四类, 发现 HRHL、HRLL、LRHL 和 LRLL 类别表现出从最高到最低的对流有效位能和大气可降水量, 以及从最低到最大的对流抑制和抬升指数。

Chen et al. (2020) 发现在一次快速发展的 MCS 中, 雷电率的增长远快于风暴体积的增长, MCS 中对流单体之间的合并可以导致 MCS 整体复杂的电荷结构, 从而导致局部电场增加, 引发更多雷电。Wang et al. (2019b) 发现约 95.7% 的层云区雷电发生在亮带形成之后, 而且大于 74.8% 的亮带上方发生或传播的层状区雷电, 有一半以上 VHF 源位于亮带区域, 确定了层云区雷电的发生和传播与亮带之间的关系。Wang et al. (2021a) 发现在小型 MCS 的发展阶段, 层云区雷电负先导大多发生在 9-12 km 高度范围内; 而在层云区较大的 MCS 中, 5-7 km 的低空范围也存在频繁的负先导。

飊线作为一种高度组织化的线状 MCS, 一般由多个对流单体侧向排列而形成的强对流云带, 通常可以持续几至十几小时, 伴随有大风, 短时强降水, 冰雹甚至龙卷。飊线中对流单体的合并是维持对流发展的关键, Lu et al. (2021) 发现单体合并过程中两单体总闪频数经历了从略微下降至急剧上升的过程, 合并完成时达到峰值, 而且合并对前后, 两个单体的雷电活动明显不同, 有的雷电增加, 有的减少, 合并产生的强辐合使上升气流将更多水汽从低层带到高层, 有利于冰相粒子的形成, 从而加强非感应起电过程。上升气流主导的砧状云区和下沉气流主导的出流区是两个对流单体迅速连接合并的主要原因, 合并后中层的霰和雪质量大幅增加, 上层冰晶平流移动, 质量基本没有增加 (Lu et al., 2022a)。于函等 (2022) 统计分析了飊线雷电活动和雷达回波强度之间的关系, 发现飊线雷电集中发生在 30 dBZ 以上的前部线状对流云区强回波区域和 6-11 km 的高度范围内, 总闪频数和雷达强回波体积的时间演变规律基本相同, 但是达到峰值的时间并不完全同步, 存在提前或滞后的情况。

6.2 热带气旋的雷电活动及对台风增强的指示意义

西北太平洋是热带气旋最活跃的区域之一, 雷电密度最大值分布在东南亚沿海和热带岛屿, 最强雷电活动出现于南海中南部季风季节, 热带气旋接近登陆时会产生频繁的雷电 (Zhang et al., 2018)。Zhang et al. (2020c) 发现热带

气旋对西北太平洋所有雷电的平均贡献约为 4.9%，其中热带风暴贡献最大为 2%。热带气旋贡献的雷电中心峰值位置初夏至夏末向极地移动，在夏末至秋季向赤道移动，且 La Niña 期间对雷电的贡献为 5.0%，超级台风贡献最大为 1.8%；El Niño 期间对雷电的贡献为 3.2%，热带风暴贡献最大为 2.2%。Kong et al. (2021) 指出雷电频数峰值和最大持续风速之间的时间差可以作为热带气旋强度变化的潜在预测参数，风暴增强过程中雷电频数峰值先于最大持续风速，时滞中位数为 59h，风暴减弱过程中雷电频数峰值后于最大持续风速，时滞中位数为-64h，根据风强随时滞峰值的变化分别建立方程对热带气旋强度变化进行了预测。Zhang et al. (2019b) 发现海燕 (2013) 中雷电在台风快速增强阶段主要发生在下切变象限内，在台风最强阶段主要发生在眼壁更换周期后，在台风强度减弱阶段主要发生在左上切变象限内，三次主要爆发过程中雨带中地闪均相对较少，热带气旋内核雷电爆发的径向和方位角分布可以为对流结构与强度变化的关系提供指示性信息。LMI 和 WWLLN 两个探测系统观测到的山竹 (2018) 雷电活动的空间分布、时间演变和径向分布模式一致，但是 LMI 在台风内核中探测的云闪比例较高 (Zhang et al., 2020b)。

6.3 雷电预报和基于雷电的强对流事件预警

雷电因其强大的电流、高温、强烈的电磁辐射等物理效应，能够在瞬间产生巨大的破坏作用，对雷电活动进行预报对防灾减灾具有重要的实际意义。

近几年，随着人工智能的快速发展，机器学习也逐步应用于雷电预报中。Lin et al. (2019) 提出了一种基于注意力的双源时空神经网络 (ADSNet)，通过将最近的雷电观测资料和模拟结果耦合进雷电预报模型中，增强在预测过程中模拟资料的有价值信息，使得每个模拟参数可以自适应调整，从而有效改善了 12h 雷电预测方法，也使输入的各种气象参数的贡献具有了解释性。Guo et al. (2022) 将观测与 WRF 产品合并训练，构建了一个多输入和多输出的卷积长短期记忆雷电极近预报模型 (CLSTM LFN)，这种模型在合并多源资料后，可以实现 0-3h 雷电发生区域的有效预测，且卷积的作用随着预报时间的增加而显著增加，对流有效势能的相对重要性显著大于其他物理变量。Zhou et al. (2020) 基于葵花 8 卫星和雷达回波数据，使用语义分割深度学习网络开发了一种 0-1 小时的地闪极近预报算法 (LightningNet)，多源观测数据和高分辨率数值预报模

式数据合并，可以产生良好的 2–6 小时闪电预测。Zhou et al. (2022) 设计了一种双向时空传播器 LightNet+，用于编码 WRF 数据的前向和后向趋势信息，可以充分分析和利用模拟数据中的时间相关性。Geng et al. (2021) 建立了基于深度神经网络的多源数据驱动预测模型 LightNet。LightNet 中的双编码器提取 WRF 模式数据的时空特征和最近对闪电数据的观测，以校准模拟产物并辅助预测，可显著改进 6 小时预测，数据源越多，预测性能越好。Cui et al. (2022) 使用三维总闪数据和连续波雷达垂直探测数据，建立了基于网格盒对应关系的定量和诊断关系，通过使用光梯度增强机算法 (Light Gradient Boosting Machine algorithm)，开发了一个集成多个雷达参数的雷电诊断程序，预报闪电发命中率 93.5%。Xu et al. (2022a) 设计了一种可以预测总闪覆盖范围的模型，这种模型在雨季 6-8 月和当地时间 14:00-20:00 有更好的预测能力，且雷暴规模越大，可预测性越强。但是使用该模型预测的雷电活动的覆盖范围相对集中，雷电密度高于观测值。Srivastava et al. (2022) 利用邻域技术得到雷暴单体的边界，通过对单个雷暴进行追踪，在雷电到达关注区域之前结合实时观测的总闪资料，对雷电概率进行近距离预测，在 30 分钟、15 分钟和 5 分钟的提前时间内，准确率分别为 63%、80% 和 91%。

Zhou et al. (2019) 提出了一种基于数值天气预报模式数据的深度学习方案，对不同天气的再分析数据集进行训练最终输出预测，发现深度学习可以自动提取强对流天气的非线性特征，使得其对雷暴的风险评分 (Threat Scores, TS) 提高了 16.1%。Geng et al. (2021) 基于深度学习，构建了一个可以处理具有不同时空分布的多个数据源的通用预测模型 LightNet+，可以提取不同数据源的互补信息进行预报。与同为深度学习模型的 Step Deep 对比，使用多源多时空分布的数据改进了性能，6 小时内的探测概率 (Probability of Detection, POD) 提高了 12%。Zhou et al. (2022) 为解决局部邻域无法捕获长期时空依赖关系的问题，提出了一个双向时空转换的双源闪电预报网络，将 WRF 仿真数据融入了 LightNet+，12 小时内公平技巧评分 (Equitable Threat Score, ETS) 提高了 10%。

研究表明，雷电跃增与降雹、强降水、大风等灾害性天气事件存在一定关系。雷电跃增指雷电频数在短时间内跳跃性增加的现象，通常在强对流灾害性天气前发生，因此可以通过雷电跃增来改进对灾害性天气现象的预警。Tian et

al. (2019) 提出总 2σ 雷电跃增对北京地区冰雹的临近预报有潜在价值, 使用雷电频数及对应的 2σ 雷电跃增算法对冰雹进行临近预报, 发现 81.8% 的冰雹事件之前发生 2σ 雷电跃增。孙萌宇等 (2020b) 对多次降雹的一次强雷暴过程进行分析发现, 降雹前和降雹过程中总闪频数均出现增加, 大部分出现正地闪突增的现象, 而降雹后正地闪频数减少。Tian et al. (2022) 进一步将双极化雷达的水凝物分类结果与 2σ 雷电跃增算法结合, 发现大冰雹、霰和小冰雹的相邻时刻格点数之比的局部峰值可以有效识别出有效和无效的雷电跃增, 通过去除无效雷电跃增降低了虚警率, 从而提高了 2σ 雷电跃增算法的冰雹精细预警性能。Wu et al. (2018) 开发了一种基于降雨和雷电跳跃算法的短时降雨 (即 < 6 小时) 事件的临近预测方法, 可以为区域尺度到中尺度短时降雨事件提供早期预警。

6.4 雷电资料同化改进强对流预报

雷电可以很好地反映对流的位置和强度, 与对流系统内垂直上升运动和冷云过程密切相关。雷电资料同化可为数值模式的初始场增加更多的中小尺度对流信息, 进而改进强对流天气预报, 而且雷电定位资料具有较高的分辨率, 在雷达探测盲区, 雷电探测可作为一个有效的资料补充。

Wang et al. (2018b) 采用时滞集合卡尔曼滤波技术来同化闪电反演出的霰粒子混合比, 该方案给强对流系统的分析场和预报场带来了正面效果。Chen et al. (2019b) 提出了一种综合调整水物质含量的雷电资料同化方案, 以总体理查德森数衡量模式动力、热力状况, 根据模式不同动力、热力状况和雷电频数来调整低层大气水汽混合比和混合相态层内软雹含量, 发现采用雷电资料同化后, 模式对对流活动的模拟更加接近实际观测, 模拟出的冷池强度、范围以及降水落区等更接近实际观测。Zhang et al. (2020a) 将热带气旋雷电资料耦合进数值模式中, 发现随着雷电资料同化增加, 强度预测的改善明显, 同化内核雷电资料对台风强度预报的改善可维持约 48h。但是当模拟的台风强度大于实际台风强度时, 可能会产生负面影响。

Xiao et al. (2021a) 开发了一种基于云尺度模式的四维变分同化雷电资料更新模式动力场的方法, 首先建立垂直速度最大值与总雷电频数的经验关系, 按照传统的对流模型“双曲线”将雷电资料转化为雷电格点上垂直运动, 敏感性实验和同化雷电资料对比实验表明, 同化雷电资料增加了中层的垂直速度, 产

生更多的潜热释放并导致了雷暴强度更强，这些修改有助于维持对流风暴的生命，也可以促发新对流的产生。Chen et al. (2020) 通过雷电资料反演出适用于对流尺度资料同化的垂直速度场，在 WRFDA 中构建相应的三维变分 (Three-dimensional Variational, 3DVar) 观测算子更新模式动力场，利用“风四”卫星的 LMI 雷电产品进行同化应用，发现同化雷电资料可以有效改进山区的动力场结构，这种更新模式动力场的方式，直接促进垂直运动的形成，进而影响热力和微物理过程和对流系统的移动和发展，提升了定量降水预报的能力。

Xiao et al. (2021b) 进一步探索了这种更新动力场的雷电资料同化方法在业务预报模式中的应用，发现高分辨率局域雷电全闪定位资料对小尺度对流过程的解析具有优势，并通过增强对流系统内部和附近的辐合和上升气流，改善了模式的动力学状态，四维变分 (Four-dimensional Variational, 4DVar) 业务预报实时雷电同化的时间间隔为 3 分钟。Zhang et al. (2023) 研究了这种调整动力场的雷电资料同化方法在快速更新同化业务预报系统的适用性，发现雷达径向速度和雷电资料的同化作用具有协同性，雷达径向速度同化可以在较长时间内提高预报精度，雷电垂直速度同化可以对预报的降水强度和位置进行校正，雷电资料同化提高了对强降水的三维热力学结构的模拟能力以及短期预报能力，积极影响可持续至少 3h。Gan et al. (2021) 基于总闪频数和最大垂直速度之间的关系，通过集合平方根滤波器 (EnSRF) 方法在云分辨尺度上同化总闪数据，改善了水蒸气场，并提供了一个暖湿环境，进一步改进对流预报。Wang et al. (2020b) 同样利用总闪频数和最大垂直速度关系的同化方案，在飑线个例研究和汛期预报中提高了短时降水的预报技巧。

7 雷电对气候变化的影响与响应

雷电在较长时间内具有重要的气候影响（通过产生 NO_x 和野火等）。尽管目前还很难准确预测未来的雷电变化，但人类活动增加和气候变暖等多种因素加大了人类遭受雷电灾害的风险。随着最近三十多年对雷电的可靠探测，在全球和区域尺度上实现了对雷电活动的空间和地基监测，雷电定位资料逐渐有了较长时间尺度的积累。在全球气候变暖背景下，雷电活动怎样变化，雷电又如何影响大气成分和大气化学，进而影响天气气候，成为大气电学研究的新探索。

7.1 雷电的气候分布及其对大气成分的影响

由于缺乏长时间连续和均匀的雷电观测资料，研究雷电的气候分布研究仍然具有很大的挑战性。随着雷电资料的积累，近五年来，对这一问题的研究有了一定的进展。

Xu et al. (2022b) 利用中国气象局的 CNLDN 地闪数据集，分析了 2010–2020 年中国陆地区域的雷电气候分布，中国陆地区域平均雷电密度 $0.91 \text{ km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ，其分布由南向北、由东至西逐渐减少。春季、夏季、秋季雷电活动在早晨相对较少，在下午最活跃，而冬季雷电活动在夜间和清晨最为活跃。峰值电流大于 75kA 的正地闪是峰值电流大于 75kA 负地闪的 3 倍以上，地闪平均峰值电流与地闪活动呈相反的日变化规律。Xu et al. (2023) 分析了中国陆地区域地闪空间模态分布特征及其可能的气候成因，发现厄尔尼诺-南方涛动 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 是中国陆地区域地闪活动的气候驱动因子。

雷电在对流层中产生氮氧化物 (LNO_x)，是对流层臭氧 O_3 的重要前体物，对大气成分和大气化学有重要影响。郭凤霞等 (2019) 分析了青藏高原雷电产生的 NO_x 经由光化学反应对 O_3 浓度变化及夏季 O_3 低谷形成的影响，夏季青藏高原强雷暴天气导致对流层中上部氮氧化物浓度升高，并随强上升气流向对流层顶输送，通过光化学反应使 O_3 浓度增加，抑制了青藏高原夏季 O_3 低谷的进一步深化。Li et al. (2022b) 评估了 LNO_x 对青藏高原表面 O_3 的贡献，夏季青藏高原地表 NO_x 的排放中 LNO_x 贡献约 15%，占地表日 8 小时最大平均 (MDA8) O_3 总浓度的 $17.5\% \pm 14.5\%$ 。并且 LNO_x 显著影响 NO_x 、OH 和 MDA8 O_3 表面浓度，雷电对青藏高原上涉及 O_3 的大气化学过程有显著影响。Li et al. (2022c) 基于 2014–2018 年地闪定位资料，估计了中国大陆 LNO_x 总量，认为负地闪产生的 NO_x 较正地闪多。

7.2 雷电对气候变化的响应

雷电通过产生 NO_x 和诱发野火对生态系统和大气化学有显著影响，进而影响地球的气候系统，而雷电对气候变化也有敏感响应。在气候变化背景下，雷电活动如何变化是一个备受关注的问题。

基于 1996–2013 年 LIS/OTD 卫星雷电资料，Qie et al. (2020b) 分析了全球雷电活动的变化趋势，结果表明全球平均雷电密度没有显著趋势，而区域尺度

上变化不一，北美东南部、南美洲中部和澳大利亚东部雷电密度降低显著，对流有效位能的减小可能是最为显著的影响因素；而南亚西北部雷电密度显著增加，气溶胶的增加对这一趋势的贡献较大。Qie et al. (2020a) 进一步发现雷电活动在整个亚洲季风区都表现出明显增长趋势，但在南亚季风区的热力学效应对于雷电活动的影响大于微物理效应。

青藏高原是对气候变化最敏感的地区之一，近几十年来呈现出显著增暖趋势，在这种增暖背景下，青藏高原上雷电活动如何变化呢？Li et al. (2020c) 基于 LIS/OTD 雷电资料分析发现，青藏高原的雷电密度自东向西呈现逐渐减小的趋势，东部雷电密度最大，5-9 月的雷电占全年雷电活动的 96.8%，提出将降水率与波文比（感热通量与潜热通量之比）、地表比湿的乘积作为修正降水率，发现修正后的降水率在季节变化上和雷电的关系更好。基于地面台站的雷暴观测，Zhang et al. (2023) 指出 1961-2010 年间青藏高原以本站点的雷暴日的年平均均值呈减少趋势，减少率在 1% 左右，这一下降趋势在 5-9 月尤为明显。Zou et al. (2018) 研究了青藏高原的冰雹日和雷暴日变化趋势及原因，认为高原地区显著变暖改变了该地区大尺度的热力学和动力学条件，地表强烈增温导致的对流层中层干燥是 1960 年以来青藏高原上暖季雷暴日下降的主要原因，而大气变暖造成的融化层高度增加是 1980 年以来冰雹日下降的原因，全球变暖可能会导致下个世纪青藏高原强雷暴和冰雹形成所需条件的减少。Qie et al. (2022a) 利用 LIS/OTD 和 WLLN 雷电资料研究发现，1997 年以来青藏高原雷电活动总体呈增加趋势，雷电活动最强增强区域出现在青藏高原东部为代表的高雷电密度区域。这一结果与前面提到的雷暴日和冰雹日变化趋势不同，其原因一方面与所选用的参量和资料不同有关，同时也与时间段的选取有一定关系。另外，一个雷暴日中可能会有多个雷暴发生，一次雷暴也可能产生不同数量的雷电活动，基于 TRMM 卫星的降水特征和雷电资料定义的雷暴数量在青藏高原上也呈增加趋势，而作为雷暴强度指标的 30dBZ 和 40dBZ 的平均最大高度、发展深度和体积均没有表现出显著的增加趋势，表明雷暴频次的增加导致了青藏高原上雷电活动的显著增加。导致这一结果的大气环境热动力原因值得进一步研究。

8 展望

近年来通过发展高分辨率雷电探测和定位新技术，在雷电物理过程和机制、人工引发雷电、高塔雷电、雷暴对上层大气的影响、不同类型雷暴系统中雷电活动和电荷结构特征等方面都取得了实质性进展，特别是基于多手段综合观测研究，揭示了雷电正、负先导的传播特征和异同，对地闪连接过程精细结构和机制、雷暴云上方的蓝色喷流和地球伽马射线闪与雷电的关系等方面都取得了突破性认识，显著提高了雷电物理机制以及对上层大气影响的理解。通过观测和数值模拟研究，揭示了不同类型雷暴系统中雷电活动和电荷结构分布特征，发展了雷电资料同化方法和雷电预报方法，在雷电资料的积累和气象学利用上取得了重要进展。

强对流雷暴云内的起电和雷电强烈的依赖于云内的动力和微物理过程的发展，但由于云内过程的复杂性和直接测量的困难，对于雷暴云内的电荷如何产生并激发闪电放电仍然是被持续关注但未能充分认识的重要科学问题，比如：云内的电荷到底如何产生？多强的云内电场可以激发闪电放电？什么过程在什么位置诱发了闪电？等。这些问题不仅是当前大气电学领域的难点科学问题，也是亟待解决的前沿和基础科学问题。实际上，最近越来越多的观测在证明一种新的闪电始发机制，即有高能粒子参与的相对论逃逸电子雪崩机制，传统的空气击穿机制和逃逸击穿机制在闪电始发过程中的相对重要性已经成为学术界高度关注的新的热点问题。近年来，多频段高时空分辨率三维射频成像技术的发展，特别是具有偏振功能的闪电 VHF 干涉仪的出现，大大增强了我们对闪电的探测能力，为明确闪电的始发过程和机制提供了关键的技术手段；雷暴云内电场和水成物粒子荷电量的原位探测，也有助于我们对云内起电过程和闪电始发位置的认识。因此，展望未来，大气电学亟待解决的科学问题主要包括：（1）真实雷暴云中起电的微物理机制，（2）自然雷电在云内的始发机制及其和高能辐射的关系，（3）人工智能在雷电预报、波形识别和精确定位中的应用；（4）雷电对气候变化和人类活动的响应；（5）中高层闪电发生机制及对上层大气环境的影响；（6）全球和区域气候模式中雷电的参数化和预测等。

参考文献

- Cai L, Chu W X, Wang J G, 2022a. Observation and modeling of dart leader development in an altitude-triggered lightning flash[J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 127, e2022JD037545. <https://doi.org/10.1029/2022JD0375>
- Cai L, Hu Q, Zhou M, et al. 2022b. Characteristics of continuing current waveforms and M-component parameters in triggered lightning[J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 127, e2022JD036878. <https://doi.org/10.1029/2022JD03687>
- Cai L, Li J, Wang J G, et al. 2021. Differences between flashes with and without return strokes in rocket-triggered lightning[J]. Geophys. Res. Lett., 48, e2021GL093483. <https://doi.org/10.1029/2021GL093483>
- Cao D J, Lu F, Zhang X H, et al. 2021. Lightning activity observed by the Fengyun-4A lightning mapping imager[J]. Remote Sens.-Basel., 13(15). 3013. DOI:10.3390/rs13153013
- Chen L W, Lyu W T, Ma Y, et al. 2022a. Return-stroke current measurement at the Canton Tower and preliminary analysis results[J]. Electr. Pow. Syst. Res., 206. 107798. DOI:10.1016/j.epsr.2022.107798
- Chen Z X, Qie X S, Liu D X, et al. 2019. Lightning data assimilation with comprehensively nudging water contents at cloud-resolving scale using WRF model[J]. Atmos. Res., 22: 72–87. doi: 10.1016/j.atmosres.2019.02.001
- Chen Z X, Qie X S, Yair Y, et al. 2020a. Electrical evolution of a rapidly developing MCS during its vigorous vertical growth phase[J]. Atmos. Res., 246. 105201. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105201
- Chen Z X, Sun J Z, Qie X S, et al. 2020b. A method to update model kinematic states by assimilating satellite-observed total lightning data to improve convective analysis and forecasting[J]. J. Geophys. Res. Atmos., doi: 10.1029/2020JD033330
- Chen Z X, Qie X S, Sun J Z, et al. 2021. Evaluation of Fengyun-4A lightning mapping imager (LMI) performance during multiple convective episodes over Beijing[J]. Remote Sens.-Basel., 13(9): 1746. DOI:10.3390/rs13091746
- Chen Z F, Zhang Y, Zheng D, et al. 2019a. A method of three - dimensional location for LFEDA combining the time of arrival method and the time reversal technique[J]. J. Geophys. Res. Atmos., 124(12): 6484-6500. doi:10.1029/2019JD030401
- Chen Z F, Zhang Y, Fan Y F, et al. 2022b. Close observation of the evolution process during initial stage of triggered lightning based on continuous interferometer[J]. Remote Sens.-Basel., 14(4): 863. DOI:10.3390/rs14040863
- Cui Y X, Zheng D, Zhang Y J, et al. 2022. Association of lightning occurrence with precipitation cloud column structure at a fixed position[J]. Atmospheric Research, 267, 105989, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105989>

- Dai B Z, Li J, Zhou J H, et al., 2022. Application of a Modified Empirical Wavelet Transform Method in VLF/LF Lightning Electric Field Signals[J]. *Remote Sens.*, 14(6), 1308. DOI: 10.3390/rs14061308
- Fan X P, Zhang Y J, Krehbiel P R, et al. 2021a. Application of Ensemble Empirical Mode Decomposition in Low-Frequency Lightning Electric Field Signal Analysis and Lightning Location[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 59(1): 86-100. DOI:10.1109/TGRS.2020.2991724
- Fan Y F, Lu G P, Li X, et al. 2019. Measurements of magnetic pulse bursts during initial continuous current of negative rocket - triggered lightning[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124(22): 11710-11721. DOI:10.1029/2019JD031237
- Fan Y, Lu G, Zhang Y, et al. 2020. Characterizing radio radiation of initial upward leader stepping in triggered lightning with interferometric lightning mapping[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 47, e2020GL089392. DOI:10.1029/2020GL089392
- Fan Y F, Lyu W T, Lu G P, et al. 2021b. Electromagnetic characteristics of upward leader initiated from the Canton Tower: A comparison with rocket - triggered lightning[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126(21). DOI:10.1029/2021JD034998
- Fan Y F, Zhang Y, Lu G P, et al. 2022. First measurements of low-medium frequency magnetic radiation for an altitude-triggered lightning flash[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 49, e2022GL098867. <https://doi.org/10.1029/2022GL098867>.
- Gan R H, Yang Y, Qiu X B, et al. 2021. Assimilation of the maximum vertical velocity converted from total lightning data through the EnSRF method [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126, e2020JD034300. <https://doi.org/10.1029/2020JD034300>
- Gao Y, Chen M L, Lyu W T, et al. 2020. Leader charges, currents, ambient electric fields, and space charges along downward positive leader paths retrieved from ground measurements in metropolis[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125(19). DOI:10.1029/2020JD032818
- Geng Y A, Li Q Y, Lin T Y. 2021. A deep learning framework for lightning forecasting with multi-source spatiotemporal data[J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 147, 4048–4062, <https://doi.org/10.1002/qj.4167>.
- Guo S C, Wang J Y, Gan R H, et al. 2022. Experimental study of cloud-to-ground lightning nowcasting with multisource data based on a video prediction method[J]. *Remote Sens.*, 14(3), 604. DOI: 10.3390/rs14030604
- 郭凤霞, 穆奕君, 李扬, 等. 2019. 闪电产生氮氧化物对青藏高原臭氧低谷形成的影响. *大气科学*, 43(2), 266-276. Guo Fengxia, Mu Yijun, Li Yang, et al. 2019. Effects of nitrogen oxides produced from lightning on the formation of the ozone valley over the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 43 (2): 266–276.
- 郭凤霞, 王曼霏, 黄兆楚, 等. 2018. 青藏高原雷暴电荷结构特征及成因的数值模

- 拟研究. 高原气象, 37(4), 911-922. Guo Fengxia, Wang Manfei, Huang Zhaochu, et al, 2018. The model analysis of lightning charge structure characters and attributions over Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Plateau Meteorology, 37(4): 911 — 922.
- He Q J, Yang J, Lu G, et al. 2019. Analysis of the first positive polarity gigantic jet recorded near the Yellow[J]. J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 19:6-15. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.04.015
- Huang A J, Lu G, Zhang H B, et al. 2018, Locating parent lightning strokes of sprites observed over a mesoscale convective system in Shandong province, China[J]. Adv. Atmos. Sci., 35(11): 1396-1414. DOI: 10.1007/s00376-018-7306-4
- Huang S X, Chen W J, Fu Z, et al. 2022. Separate luminous structures leading positive leader steps[J]. Nat. Commun., 13(1). DOI:10.1038/s41467-022-31409-x
- Hui W, Huang F X, Liu R X. 2020a. Characteristics of lightning signals over the Tibetan Plateau and the capability of FY-4A LMI lightning detection in the Plateau[J]. Int. J. Remote Sens., 41(12): 4605-4625. DOI:10.1080/01431161.2020.1723176
- Jiang R S, Qie X, Li Z X, et al. 2020b. Luminous crown residual vs. bright space segment: characteristic structures for the intermittent positive and negative leaders of triggered lightning[J]. Geophys. Res. Lett., 47(21). DOI:10.1029/2020GL088107
- Jiang R B, Yuan S F, Qie X S, et al. 2022. Activation of abundant recoil leaders and their promotion effect on the negative - end breakdown in an intracloud lightning flash[J]. Geophys. Res. Lett., 49(1). DOI:10.1029/2021GL096846
- Jiang R B, Srivastava A, Qie X S, et al. 2021a. Fine structure of the breakthrough phase of the attachment process in a natural lightning flash[J]. Geophys. Res. Lett., 48(6).DOI:10.1029/2020GL091608
- Jiang R J, Lyu W T, Wu B, et al. 2021b. First documented downward positive cloud - to - ground lightning initiated by an upward negative lightning[J]. J. Geophys. Res. Atmos., 126(13).DOI:10.1029/2021JD034566
- Jiang R J, Lyu W, Wu B, et al. 2020a. Simulation of cloud-to-ground lightning strikes to structures based on an improved stochastic lightning model[J]. J. Atmos Sol-Terr Phys., 203: 105274.DOI:10.1016/j.jastp.2020.105274
- Kong X Z, Zhao Y, Qiu Z F, et al. 2021. A Simple Method for Predicting Intensity Change Using the Peak Time Lag Between Lightning and Wind in Tropical Cyclones[J]. Geophys. Res. Lett., 48(2). DOI:10.1029/2020GL088872
- Li F Q, Sun Z L, Liu M Y, et al. 2021a. A new hybrid algorithm to image lightning channels combining the time difference of arrival technique and electromagnetic time reversal technique[J]. Remote Sens.-Basel., 13(22): 4658. DOI:10.3390/rs13224658

- Li F Q, Sun Z L, Jiang R B, et al. 2021b. A rocket - triggered lightning flash containing negative - positive - negative current polarity reversal during its initial stage[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126(9).DOI:10.1029/2020JD033187
- Li J, Dai B Z, Zhou J, et al., 2022a. Preliminary application of long-range lightning location network with equivalent propagation velocity in china[J]. *Remote Sens.*, 14(3): 560. DOI: 10.3390/rs14030560
- Li J L, Wu X K, Yang J, et al., 2020c. Lightning activity and its association with surface thermodynamics over the Tibetan Plateau[J]. *Atmos. Res.*, 245, 105118. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105118
- Li M L, Mao J Y, Chen S Q, et al. 2022b. Significant contribution of lightning NO_x to summertime surface O₃ on the Tibetan Plateau[J]. *Sci. Total Environ.*, 829, 154639. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154639
- Li P F, Zhai G F, Pang W J, et al. 2021c. Preliminary research on a comparison and evaluation of FY-4A LMI and ADTD data through a moving amplification matching algorithm[J]. *Remote Sens.-Basel.*, 13(1):11. DOI:10.3390/rs13010011
- Li Q, Guo F X, Ju X Y, et al. 2022c. Estimation of lightning-generated NO_x in the mainland of china based on cloud-to-ground lightning location data[J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 40(1): 129-143. DOI:10.1007/s00376-022-1329-6
- Li Q X, Rachidi F, Rubinstein M, et al. 2020a. Measurement and modeling of both distant and close electric fields of an M-component in rocket-triggered lightning[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125, e2019JD032300. DOI:10.1029/2019JD032300
- Li S L, Qiu S, Shi L H, et al. 2020b. Observations of the wire destruction and plasma channel reestablishment process during the initial stage of triggered lightning[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 47, e2019GL086001. <https://doi.org/10.1029/2019GL086001>
- Li X, Lu G P, Fan Y F, et al. 2019. Underground Measurement of Magnetic Field Pulses During the Early Stage of Rocket-Triggered Lightning[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124(6): 3168-3179. DOI:10.1029/2018JD029682
- Li X, Lu G P, Jiang R B, et al. 2021d. On the Transition From Precursors to the Initial Upward Positive Leader in Negative Rocket - Triggered Lightning[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126(17). DOI:10.1029/2020JD033926
- Li Y, Qiu S, Shi L H, et al. 2018. Observed Variation of Three-dimensional Return Stroke Speeds Along the Channel in Rocket-triggered Lightning[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 45(22). 12569-12575. doi:10.1029/2018GL079783
- 廉纯皓, 郭凤霞, 曾凡辉, 等. 2020. 雷暴云中起电活动对动力和微物理过程的影响[J]. *大气科学*, 44(01), 138-149. Lian Chunhao, Guo Fengxia, Zeng Fanhui, et al. 2020. Influence of Electrical Activity on Dynamical and Microphysical Processes in Thunderstorms[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 44(1): 138-149.
- Lin T Y, Li Q Y, Geng Y L, et al. 2019. Attention-based dual-source spatiotemporal neural network for lightning forecast[J]. *IEEE Access*, 7, 158296-158307. DOI:

10.1109/ACCESS.2019.2950328

- 林晓彤, 师正, 谭涌波, 等. 2021. 不同水汽条件下气溶胶对雷暴云电过程影响的数值模拟研究[J]. 气象学报, 79(3), 458-476. Lin Xiaotong, Shi Zheng, Tan Yongbo, et al. 2021. A numerical study of aerosol impacts on thunderstorm electrification under different water vapor conditions[J]. Acta Meteorologica Sinica, 79(3). 458-476.
- Liu B, Shi L H, Qiu S, et al. 2019. Three-dimensional lightning positioning in low-frequency band using time reversal in frequency domain[J]. IEEE T. Electromagn C., 62 (3), 774-784. doi:10.1109/TEMPC.2019.2920302
- Liu D X, Sun M Y, Su D B, et al. 2021c. A five-year climatological lightning characteristic of linear mesoscale convective systems over North China[J]. Atmos. Res., 256, 105580. DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105580
- Liu F F, Lu G P, Neubert T, et al. 2021a. Optical emissions associated with narrow bipolar events from thunderstorm clouds penetrating into the stratosphere[J]. Nat. Commun., 12(1). DOI:10.1038/s41467-021-26914-4
- Liu F F, Zhu B Y, Lu G P, et al. 2018, Observations of blue discharges associated with negative narrow bipolar events in active deep convection[J]. Geophys. Res. Lett., 45(6): 2842-2851. DOI: 10.1002/2017GL076207
- Liu F F, Zhu B Y, Lu G P, et al. 2021e. Meteorological and electrical conditions of two mid - latitude thunderstorms producing blue discharges[J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 126(8). DOI:10.1029/2020JD033648
- Liu M Y, Jiang R B, Li Z X, et al. 2020c. Circuitous attachment process in altitude-triggered lightning striking a 30-m-high tower[J]. Atmos. Res., 244: 105049. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105049
- Liu Y, Wang H B, Li Z, et al. 2021b. A verification of the lightning detection data from FY-4A LMI as compared with ADTD-2[J]. Atmos. Res., 248: 105163. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105163
- Liu Y, Guha A, Said R, et al. 2020a. Aerosol effects on lightning characteristics: a comparison of polluted and clean regimes[J]. Geophys. Res. Lett., 47(9). DOI:10.1029/2019GL086825
- Liu Y, Williams E, Li Z, et al. 2021d. Lightning enhancement in moist convection with smoke - laden air advected from Australian wildfires[J]. Geophys. Res. Lett., 48(11). DOI:10.1029/2020GL092355
- Liu Z, Zheng D, Guo F X, et al. 2020b. Lightning activity and its associations with cloud structures in a rainstorm dominated by warm precipitation[J]. Atmos. Res., 246, 105120. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105120
- Lu G P, Peng K M, Xian T, et al. 2022b, Contrast between continental and oceanic thunderstorms in producing red sprites and halos[J]. Frontiers in Earth Science. 10. DOI:10.3389/feart.2022.961566

- Lu G P, Zhang H B, Cummer S, et al. 2019. A comparative study on the lightning sferics associated with terrestrial Gamma-ray flashes observed in americas and asia[J]. J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 183: 67-75. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.01.001
- Lu J Y, Qie X S, Jiang R B, et al. 2021. Lightning activity during convective cell mergers in a squall line and corresponding dynamical and thermodynamical characteristics[J]. Atmos. Res., 256, 105555. DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105555
- Lu J, Qie X S, Xiao X, et al. 2022a. Effects of convective mergers on the evolution of microphysical and electrical activity in a severe squall line simulated by WRF coupled with explicit electrification scheme[J]. J. Geophys. Res. Atmos., 127(16). DOI:10.1029/2021JD036398.
- Lyu F C, Cummer S, Briggs M, et al. 2021, Terrestrial Gamma - ray flashes can be detected with radio measurements of energetic in - cloud pulses during thunderstorms[J]. Geophys. Res. Lett., 48(11). DOI:10.1029/2021GL093627
- Lyu W T, Zheng D, Zhang Y, 2023. A review of atmospheric electricity research in China from 2019 to 2022[J]. Adv. Atmos. Sci., doi:10.1007/s00376-023-2280-x
- Ma Z L, Jiang R B, Qie X S, et al. 2021c. A low frequency 3D lightning mapping network in north China[J]. Atmos. Res., 249: 105314. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105314
- Ma Z L, Jiang R B, Sun Z L, et al. 2020. Characteristics of impulsive currents superimposing on continuous/continuing current of rocket-triggered lightning[J]., IEEE T. Electromagn C., 62(4): 1200-1208. doi:10.1109/TEM.2019.2924993
- Ogunsua B, Srivastava A, Bian J , et al. 2020. Significant day-time ionospheric perturbation by thunderstorms along the west african and congo sector of equatorial region[J]. Sci. Rep., 10(1). DOI:10.1038/s41598-020-65315-3
- Pan Z X, Mao F Y, Rosenfeld D, et al. 2022. Coarse sea spray inhibits lightning[J]. Nature Commun., 13(1). DOI:10.1038/s41467-022-31714-5
- Pu Y J, Qie X S, Jiang R B, et al. 2019. Broadband characteristics of chaotic pulse trains associated with sequential dart leaders in a rocket-triggered lightning flash[J]. J. Geophys. Res. Atmos., 124, 4074–4085. https:// doi.org/10.1029/2018JD029488
- Qi Q, Lyu W T, Wang D, et al. 2021. Two - dimensional striking distance of lightning flashes to a cluster of tall buildings in Guangzhou[J]. J. Geophys. Res. Atmos., 126(22). DOI:10.1029/2021JD034613
- Qi Q, Lyu W T, Ma Y, et al. 2019. High-speed video observations of natural lightning attachment process with framing rates up to half a million frames per second[J]. Geophys. Res. Lett., 46(21): 12580-12587. DOI: 10.1029/2019GL085072
- Qie K, Qie X S & Tian W S. 2020a. Increasing trend of lightning activity in the South Asia region[J]. Sci. Bulletin, 66(1): 78-84. DOI: 10.1016/j.scib.2020.08.033
- Qie K, Tian W S, Wang W K, et al. 2020b. Regional trends of lightning activity in the

- tropics and subtropics[J]. Atmos. Res., 242. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.104960
- Qie X S, Yuan S F, Zhang H B, et al. 2019. Propagation of positive, negative, and recoil leaders in upward lightning flashes[J]. Atmos. Phys., 3(2): 102-110. DOI: 10.26464/epp2019014
- Qie X S, Qie K, Wei L, et al. 2022a. Significantly increased lightning activity over the Tibetan Plateau and its relation to thunderstorm genesis[J]. Geophys. Res. Lett., 49(6), DOI:10.1029/2022GL099894.
- Qie X S, Wei L, Zhu K X, et al. 2022b. Regional differences of convection structure of thunderclouds over the Tibetan Plateau[J]. Atmos. Res., 278, 106338. DOI: 10.1016/j.atmosres.2022.106338
- Qie X S, and Zhang Y J, 2019. A review of atmospheric electricity research in China from 2011 to 2018[J]. Adv. Atmos. Sci., 36(9), 994-1014.
- 郝秀书 杨静 蒋如斌, 等. 2010. 新型人工引雷专用火箭及其首次引雷实验结果. 大气科学, 34(5): 937-946. Qie Xiushu, Yang Jing, Jiang Rubin, et al. 2010, A New-Model Rocket for Artificially Triggering Lightning and Its First Triggering Lightning Experiment[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 34(5): 937-946
- Ren H, Tian Y, Lu G P, et al. 2019. Examining the influence of current waveform on the lightning electromagnetic field at the altitude of halo formation[J]. J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 18(S1364-6826): 30342-30343. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.04.010
- Shi Z, Hu J R, Tan Y B, et al. 2022. Significant influence of aerosol on cloud-to-ground lightning in the Sichuan Basin[J]. Atmos. Res., 278, 106330. DOI: 10.1016/j.atmosres.2022.106330
- Srivastava A, Jiang R B, Yuan S F, et al. 2019. Intermittent propagation of upward positive leader connecting a downward negative leader in a negative cloud - to - ground lightning[J]. J. Geophys. Res. Atmos., 124(24): 13763-13776. DOI: 10.1029/2019JD031148
- Srivastava A, Liu D, Xu C, et al. 2022. Lightning nowcasting with an algorithm of thunderstorm tracking based on lightning location data over the Beijing area[J]. Adv. Atmos. Sci., 39(1), 178-188. DOI:10.1007/s00376-021-0398-2
- Sun C F, Liu D X, Xiao X, et al. 2023. The electrical activity of a thunderstorm under high dust circumstances over Beijing metropolis region[J]. Atmos. Res., 106628. DOI: 10.1016/j.atmosres.2023.106628
- Sun H, Yang J, Zhang Q L, et al. 2021a. Effects of day/night factor on the detection performance of FY4A lightning mapping imager in Hainan, China[J]. Remote Sens.-Basel., 13(11): 2200.DOI:10.3390/rs13112200
- Sun M Y, Liu D X, Qie X S, et al. 2021b. Aerosol effects on electrification and lightning

- discharges in a multicell thunderstorm simulated by the WRF-ELEC model[J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 21(18), 14141-14158. DOI:10.5194/acp-21-14141-2021
- Sun M Y, Qie X S, Mansell E. et al. 2023. Aerosol impacts on storm electrification and lightning discharges under different thermodynamic environments[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 128, DOI :10.1029/2022JD037450
- 孙萌宇, 郄秀书, 刘冬霞, 等. 2020a. 北京地区闪电活动与气溶胶浓度的关系研究 [J]. *地球物理学报*, 63(5), 1766-1774. Sun Mengyu, Qie Xiushu, Liu Dongxia, et al. 2020a. Analysis of potential effects of aerosol on lightning activity in Beijing metropolitan region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(5): 1766-1774.
- 孙萌宇, 郄秀书, 孙凌, 等. 2020b. 北京城区相继多次降雹的一次强雷暴的闪电特征[J]. *大气科学*, 44(3), 601-610. Sun Mengyu, Qie Xiushu, Sun Ling, et al. 2020b. Lightning Activity of a Severe Thunderstorm with Several Hail-Fall Stages in Beijing Metropolitan Region [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* , 44(3): 601-610.
- Sun Z L, Qie X S, Liu M Y, et al. 2022. Three-dimensional mapping on lightning discharge processes using two VHF broadband interferometers[J]. *Remote Sens.-Basel.*, 14(24): 6378. DOI:10.3390/rs14246378
- 唐国瑛, 孙竹玲, 蒋如斌, 等. 2020. 一次对地转移电荷极性两次反转的人工引发雷电特征及反转机制分析[J]. *物理学报*, 69(18): 189-201. Tang Guoying, Sun Zhuling, Jiang Rubin, et al. 2020: Characteristics and mechanism of a triggered lightning with two polarity reversals of charges transferred to the ground[J]. *Acta Physica Sinica* , 69(18), 189-201.
- Tian Y, Qie X S, Sun Y, et al. 2019. Total lightning signatures of thunderstorms and lightning jumps in hailfall nowcasting in the Beijing area[J]. *Atmos. Res.*, 230, 104646. DOI: 10.1016/j.atmosres.2019.104646
- Tian Y, Yao W, Sun Y, et al. 2022. A method for improving the performance of the 2 σ lightning jump algorithm for nowcasting hail[J]. *Atmos. Res.*, 280, 106404. DOI: 10.1016/j.atmosres.2022.106404
- 王东方, 孙竹玲, 袁善锋, 等. 2020. 北京多频段闪电三维定位网及一次雷暴过程的闪电时空演化特征[J]. *大气科学*, 44(04): 851-864. Wang Dongfang, Sun Zulung, Yuan Shanfeng, et al. 2020. Beijing broadband lightning network and the spatiotemporal evolution of lightning flashes during a thunderstorm[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* , 44(4): 851-864.
- Wang F, Deng X H, Zhang Y J, et al. 2019a. Numerical simulation of the formation of a large lower positive charge center in a Tibetan Plateau thunderstorm[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124(16), 9561-9593. DOI:10.1029/2018JD029676
- Wang F, Liu H Y, Dong W S, et al. 2019b. Radar reflectivity of lightning flashes in stratiform regions of mesoscale convective systems[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124(24), 14114-14132. DOI:10.1029/2019JD031238

- Wang F, Zhang Y J, Dong W S, et al. 2021d. Characteristics of negative leader propagation area of lightning flashes initiated in the stratiform regions of mesoscale convective systems[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126(3). DOI: 10.1029/2020JD033336
- Wang H, Chen D H, Yin J F, et al. 2020b. An improvement of convective precipitation nowcasting through lightning data dynamic nudging in a cloud-resolving scale forecasting system [J]. *Atmos. Res.*, 242, 104994.
- Wang H L, Liu Y B, Zhao T L. 2018b. Continuous assimilation of lightning data using time-lagged ensembles for a convection-allowing numerical weather prediction model[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 123: 9652-9673. doi:10.1029/2018JD028494
- Wang H L, Pei Y X, Yin Y, et al. 2021e. Observational evidence of lightning - generated ultrafine aerosols[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 48(14). DOI:10.1029/2021GL093771
- Wang J G, Cao J X, Cai L, et al. 2022, Thunder acoustic signature for channel reconstruction in triggered lightning[J], *J. Appl. Phys.*, 132(12), 123301. DOI: 10.1063/5.0110866
- Wang J X, Zhang Y, Tan Y D, et al. 2021b. Fast and fine location of total lightning from low frequency signals based on deep-learning encoding features[J]. *Remote Sens.-Basel.*, 13(11): 2212. DOI:10.3390/rs13112212
- Wang T, Shi, L H, Qiu S, et al. 2018a. Multiple-antennae observation and EMTR processing of lightning VHF radiations[J]. *IEEE Access*, 6. 26558-26566. doi:10.1109/ACCESS.2018.2833115
- Wang T, Shi L H, Qiu S, et al. 2020a. Continuous broadband lightning VHF mapping array using MUSIC algorithm[J]. *Atmos. Res.*, 231:104647. DOI: 10.1016/j.atmosres.2019.104647
- Wang Y, Qie X S, Wang D F, et al. 2016. Beijing Lightning Network (BLNET) and the observation on preliminary breakdown processes [J]. *Atmos. Res.*, 171(1):121-132 <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.12.012>
- Wang Y, Min Y, Liu Y, et al. 2021c. A New approach of 3d lightning location based on pearson correlation combined with empirical mode decomposition[J]. *Remote Sens.-Basel.*, 13(19): 3883. DOI:10.3390/rs13193883
- 王庸平, 陆高鹏, 马明, 等. 2019, 中国东北地区红色精灵的母体雷暴分析[J]. *大气科学*, 43(5): 1055-1067. Wang Yongping, Lu Gaopeng, Ma Ming, et al. 2019. Analysis of parent thunderstorms of red sprites in northeast China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*. 43(5): 1055-1067. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18167
- Wang Y P, Lu G P, Ma M, et al. 2019c. Triangulation of red sprites observed above a mesoscale convective system in North China[J]. *Earth and Planetary Physics.*, 3(2): 111-125. DOI: 10.26464/epp2019015
- Wang Y P, Lu G, Cummer S, et al. 2021f. Ground observation of negative sprites over

- a tropical thunderstorm as the embryo of hurricane Harvey (2017)[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 48(14). DOI:10.1029/2021GL094032
- Wang Y P, Lu G P, Peng K M, et al. 2021g. Space - based observation of a negative sprite with an unusual signature of associated sprite current[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126(4). DOI:10.1029/2020JD033686
- 王子健, 陆高鹏, 王庸平, 等. 2020, ISUAL 探测器在青藏高原南麓地区对于红色精灵现象的观测分析[J]. *大气科学*, 44(1): 93-104. Wang Zijian, Lu Gaopeng, Wang Yongping, et al. 2020. Observational Analysis of Red Sprites by ISUAL Instrument over the Southern Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*. 44(1): 93-104. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1909.18232
- Wu B, Lyu W T, Qi Q, et al. 2022. High - speed video observations of needles in a positive cloud-to-ground lightning flash[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 49(2). DOI:10.1029/2021GL096546
- Wu B, Lyu W T, Qi Q, et al. 2021. A positive cloud-to-ground flash caused by a sequence of bidirectional leaders that served to form a ground-reaching branch of a pre-existing horizontal channel[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126(11). DOI:10.1029/2020JD033653
- Wu B, Lyu W T, Qi Q, et al. 2019c. Synchronized two - station optical and electric field observations of multiple upward lightning flashes triggered by a 310-kA +CG flash[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124(2): 1050-1063. DOI:10.1029/2018JD029378
- Wu F, Cui X P & Zhang D L, 2018. A lightning-based nowcast-warning approach for short-duration rainfall events: Development and testing over Beijing during the warm seasons of 2006–2007[J]. *Atmos. Res.*, 205:2-17. DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.02.003
- Xia R D, Zhang D L, Zhang C H, et al. 2018. Synoptic control of convective rainfall rates and cloud-to-ground lightning frequencies in warm-season mesoscale convective systems over north China[J]. *Mon. Weather Rev.*, 146(3):813-831. DOI:10.1175/MWR-D-17-0172.1
- Xian T, Lu G P, Zhang H B, et al. Implications of GNSS-inferred tropopause altitude associated with terrestrial Gamma-ray flashes[J]. *Remote Sens.*, 2021, 13(10): 1939. DOI:10.3390/rs13101939
- Xiao X, Sun J Z, Qie X S, et al. 2021a. Lightning data assimilation scheme in a 4DVAR system and its impact on very-short-term convective forecasting[J]. *Mon. Weather Rev.*, 149(2): 353-373. DOI:10.1175/MWR-D-19-0396.1.
- Xiao X, Qie X. Chen Z X, et al. 2021b. Evaluating the performance of lightning data assimilation from BLNET observations in a 4DVAR-based weather nowcasting model for a high-impact weather over Beijing[J]. *Remote Sens.* 13, 2084. DOI:10.3390/rs13112084

- Xu C, Qie X S, Sun Z L, et al. 2023. Transient luminous events and their relationship to lightning strokes over the Tibetan Plateau and its comparison regions[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 128. DOI: 10.1029/2022JD037292
- Xu L T, Xue L L, Geresdi I. 2020. How does the melting impact charge separation in squall line? A bin microphysics simulation study[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 47(21). DOI:10.1029/2020GL090840
- Xu L T, Chen S, Yao W. 2022a. Evaluation of lightning prediction by an electrification and discharge model in long-term forecasting experiments[J]. *Adv. Meteorol.*, 2022, 1-13. DOI:10.1155/2022/4583030
- Xu L T, Zhang Y J, Wang F, et al. 2019. Simulation of inverted charge structure formation in convective regions of mesoscale convective system[J]. *J. Meteorol. Soc. Jpn. Ser. II*, 97(6), 1119-1135. DOI: 10.2151/jmsj.2019-062
- Xu M Y, Qie X S, Pang W J, et al. 2022b. Lightning climatology across the Chinese continent from 2010 to 2020[J]. *Atmos. Res.*, 275: 10562. DOI: 10.1016/j.atmosres.2022.106251
- Xu M Y, Qie X S, Zhao C X. et al. 2023. Distribution of lightning spatial modes and climatic causes in China[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 16(2). 100338. DOI: 10.1016/j.aosl.2023.100338.
- Yang J, Liu N Y, Sato M, et al. 2018a. Characteristics of thunderstorm structure and lightning activity causing negative and positive sprites[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 123(15), 8190-8207. DOI:10.1029/2017JD026759
- Yang J, Qie X S, Zhong L H, et al. 2020. Analysis of a gigantic jet in southern china: morphology, meteorology, storm evolution, lightning, and narrow bipolar events[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125(15). DOI: 10.1029/2019JD031538
- Yang J, Qie X S, Zhang G S, et al. 2008. Red sprites over thunderstorms in the coast of Shandong Province, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 53(7):1079-1086. DOI: 10.1007/s11434-008-0141-8
- Yang J, Sato M, Liu N Y, et al. 2018b. A gigantic jet observed over an mesoscale convective system in midlatitude region[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 123(2), 977-996. DOI:10.1002/2017JD026878
- 于函, 张鸿波, 刘冬霞, 等. 2022. 飑线系统中的闪电活动与雷达回波特征的相关性研究[J]. *大气科学*, 46(4), 835-844. Yu Han, Zhang Hongbo, Liu Dongxia, et al. 2022. Relationship between Lightning Activities and Radar Echoes of Squall Line Convective Systems[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 46(4): 835-844.
- Yu B K, Xue X H, Kuo C L, et al. 2019. The intensification of metallic layered phenomena above thunderstorms through the modulation of atmospheric tides[J]. *Sci. Rep.*, 9(1). DOI: 10.1038/s41598-019-54450-1

- Yuan S F, Qie X S, Jiang R B, et al. 2020. Origin of an uncommon multiple - stroke positive cloud-to-ground lightning flash with different terminations[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125(15). DOI:10.1029/2019JD032098
- Yuan S F, Jiang R B, Qie X S, et al. 2019. Development of side bidirectional leader and its effect on channel branching of the progressing positive leader of lightning[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 46(3): 1746-1753.
- Yuan S F, Jiang R B, Qie X S, et al. 2021a. Side discharges from the active negative leaders in a positive cloud - to - ground lightning flash[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 48(17). DOI:10.1029/2021GL094127
- Yuan S F, Qie X S, Jiang R B, et al. 2021b. In-cloud discharge of positive cloud - to - ground lightning and its influence on the initiation of tower - initiated upward lightning[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126(24). DOI:10.1029/2021JD035600
- Yuan S F, Qie X S, Jiang R B, et al. 2023. Lightning VHF radiation mapping method for an irregular short-baseline array[J]. *Earth and Space Science*, 10, e2022EA002752. <https://doi.org/10.1029/2022EA002752>
- 孙凌, 郗秀书, Mansell E, 等. 2018. 雷暴云内电场力对起电和电荷结构的反馈作用[J]. *物理学报*, 2018, 67(16): 169201.doi:10.7498/aps.67.20180505. Sun Ling, Qie Xiu-Shu, Edward R. Mansell, Chen Zhi-Xiong, Xu Yan, Jiang Ru-Bin, Sun Zhu-Ling. Feedback effect of electric field force on electrification and charge structure in thunderstorm. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(16): 169201. doi:10.7498/aps.67.20180505.
- Zhang H, Gu S Q, Chen J H, et al. 2019a. Single-station-based lightning mapping system with electromagnetic and thunder signals[J]. *IEEE T. Plasma Sci.*, doi:10.1109/TPS.2019.2891087
- Zhang H, Lu G P, Lyu F C, et al. 2020d. First measurements of low - frequency sferics associated with terrestrial Gamma - ray flashes produced by equatorial thunderstorms[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 47(17). DOI:10.1029/2020GL089005
- Zhang H, Lu G P, Lyu F C, et al. 2021. On the terrestrial Gamma - ray flashes preceding narrow bipolar events[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 48(8). DOI: 10.1029/2020GL092160
- 张鸿波, 郗秀书, 刘明远, 等. 2021a. 基于双金属球三维电场探空仪的一次雷暴云内电荷结构观测研究[J]. *地球物理学报*, 64(04): 1155-1166. Zhang Hongbo, Qie Xiushu, Liu Mingyuan, et al. 2021a: The charge structure in a thunderstorm based on three dimensional electric field sonde[J]. *Acta. Geophys.*, 64(4), 1155–1166.
- 张鸿波, 郗秀书, 刘明远, 等. 2021b. 一次中尺度对流系统层云区域的电场探空观测和电荷结构研究[J]. *高原气象*, 40(06): 1531-1541. Zhang Hongbo, Qie Xiushu, Liu Mingyuan, et al, 2021b. Study on the Charge Structure in the Stratiform Region of a Mesoscale Convective System based on in-situ Electric

- Field Observation[J]. Plateau Meteorology, 40(6):1531-1541.
- 张金波, 张其林, 郭秀峰, 等. 2019. 大气重力波影响中高层 sprite halos 始发位置和光辐射形态的模拟研究[J]. 中国科学:地球科学, 49(06): 1024-1036. Zhang Jinbo, Zhang Qilin, Guo Xiufeng, et al. 2019. Simulation study of atmospheric gravity wave influence on the launch position and optical radiation pattern of middle and upper Sprite halos[J]. Science China Earth Sciences, 49(06): 1024-1036. DOI: 10.1007/s11430-018-9311-y
- Zhang J C, Zhou J H, Li J, et al., 2022a. Location accuracy improvement of long-range lightning detection network in China by compensating ground wave propagation delay[J]. Remote Sens., 14(14):3397. DOI:10.3390/rs14143397
- Zhang M, Lu G P, Wang Z Y, et al. 2022d. Sprite distribution of different polarities from ISUAL observations with machine learning method[J]. J. Geophys. Res. Atmos., 127(19). DOI:10.1029/2022JD036968
- Zhang R, Zhang W J, Zhang Y J, et al. 2020a. Application of lightning data assimilation to numerical forecast of Super Typhoon Haiyan (2013)[J]. J. Meteorol. Res.-Proc., 34(5), 1052-1067. DOI:10.1007/s13351-020-9145-3
- Zhang W J, Hui W, Lyu W T, et al. 2020b. FY-4A LMI observed lightning activity in Super Typhoon Mangkhut (2018) in comparison with WWLLN data[J]. J. Meteorol. Res.-Proc., 02(34): 336-352. DOI:10.1007/s13351-020-9500-4
- Zhang W J, Zhang Y J, Zheng D, et al. 2020c. Quantifying the contribution of tropical cyclones to lightning activity over the Northwest Pacific[J]. Atmos. Res., 239, 104906. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.104906
- Zhang W, Rutledge S, Xu W X, et al. 2019b. Inner-core lightning outbreaks and convective evolution in Super Typhoon Haiyan (2013)[J]. Atmos. Res., 219, 123-139. DOI:10.1016/j.atmosres.2018.12.028
- Zhang W J, Zhang Y J, Zheng D, et al. 2018. Lightning climatology over the northwest Pacific region: An 11-year study using data from the World Wide Lightning Location Network[J]. Atmos. Res., 210, 41-57. DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.04.013
- Zhang Y X, Chen Z X, Xiao X, et al. 2023. Combined assimilation of radar and lightning data for the short-term forecast of severe convection system[J]. Atmos. Res., 283, 106562. DOI: 10.1016/j.atmosres.2022.106562
- Zhao P G, Li Z Q, Xiao H, et al. 2020. Distinct aerosol effects on cloud-to-ground lightning in the plateau and basin regions of Sichuan, Southwest China[J]. Atmos. Chem. Phys., 20(21), 13379-13397. DOI:10.5194/acp-20-13379-2020
- Zheng D & Zhang Y J, 2021. New insights into the correlation between lightning flash rate and size in thunderstorms[J]. Geophys. Res. Lett., 48(24), DOI:10.1029/2021GL096085
- Zheng D, Wang D H, Zhang Y J, et al. 2019. Charge regions indicated by LMA

- Lightning Flashes in Hokuriku's winter thunderstorms[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124(13), 7179-7206. DOI:10.1029/2018JD030060
- 钟丽华, 杨静, 陆高鹏, 等. 2020. 北美地区一次冬季中尺度对流系统上空红色精灵现象的空间观测及其母体雷暴分析[J]. *大气科学*, 44(5), 997-1012.
- Zhong Lihua, Yang Jing, Lu Gaopeng, et al. 2020. Spatial observation of red sprites over a winter mesoscale convective system in North America and the analysis of its parent thunderstorm[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*. 44(5): 997-1012. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2002.19169
- Zhou K H, Zheng Y G, Li B, et al. 2019. Forecasting Different Types of Convective Weather: A Deep Learning Approach[J]. *J. Meteorol. Res.*, 33(5), 797-809. doi:10.1007/s13351-019-8162-6
- Zhou K H, Zheng Y G, Dong W S. et al. 2020. A deep learning network for cloud-to-ground lightning nowcasting with multisource data[J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 37(5), 927-942. DOI:10.1175/JTECH-D-19-0146.1
- Zhou X Y, Geng Y A, Yu H M, et al. 2022. LightNet+: A dual-source lightning forecasting network with bi-direction spatiotemporal transformation[J]. *Applied Intelligence*, 52, 11 147-11 159, <https://doi.org/10.1007/s10489-021-03089-5>.
- Zou T, Zhang Q H, Li W H, et al. 2018. Responses of hail and storm days to climate change in the Tibetan Plateau[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 45(9), 4485-4493. DOI:10.1029/2018GL077069